

УДК 621.311.С173

Самойленко Є. Г., доцент (Запорізький гідроенергетичний коледж Запорізької державної інженерної академії, м. Запоріжжя)

ПРИНЦИПОВО НОВА РОТОРНО-ЛОПАТЕВА ГІДРОТУРБІНА

Наведені результати аналізу послідовності створення гідротурбін та дослідження впливу властивостей турбін на компоновку гідроенергетичних споруд. Викладено принцип дії роторно-лопатевої турбіни та характеристику її конструкції. Приведені результати лабораторних випробувань моделі турбіни. Розглянуті перспективи використання роторно-лопатевої турбіни.

Ключові слова: турбіна, потужність, робоче колесо, лопаті, турбінна камера, будівля ГЕС.

Історія створення гідравлічних турбін сягає через кілька століть. Від теоретичного обґрунтування Леонардом Ейлером гідравлічної турбіни у 1754 році до появи дещо примітивних турбін Сафонова і Фурнейрона пройшло майже сто років. А перший патент на справжню турбіну Френсіс отримав рівно через століття після появи Теорії Ейлера. Але теперішнього вигляду радіально-осьова турбіна Френсіса набула після того, як Фінк додав до неї керовані лопатки напрямного апарата.

Надалі знадобилося ще одне століття, в ході якого Пелтон створив ковшову турбіну, Каплан запатентував осьову поворотну-лопатевою турбіну і, нарешті, в 1950 році Квятковський отримав патент на діагональну поворотну-лопатевою турбіну. На цьому, здавалося б, завершився довгий процес створення закінченого ряду турбін, які зайняли напори від 2 м до напорів понад 1000 м.

Але розвиток технічного прогресу з кожним кроком виставляв все нові й нові вимоги до властивостей турбін та їх параметрів. Довгі роки гідравлічні турбіни працювали в базовому навантаженні, як двигуни для отримання дешевої електроенергії. Та надалі, із збільшенням потужностей енергосистем, освоєнням енергії повноводних річок та з появою проблем пікових навантажень, виникла необхідність у високоманеврених турбінах великої одиначної потужності, здатних ефективно регулювати виробіток електроенергії.

В останні роки, коли в Україні забудовані всі ефективні створи великих річок, виникла потреба в будівництві ГЕС малої і середньої потужності на невеликих річках із незручними іноді створами та з мінімальним затопленням земельних угідь. Для цього необхідні турбіни компактні і недорогі, здатні розміщуватись у невисоких греблях і не

заглиблюватись в дно русел, надійно працювати, як правило, в автоматичному режимі. І турбобудівники повинні слідувати цим вимогам.

Розвиток гідротурбобудування характеризується постійним удосконаленням турбін, внаслідок якого склалися два конструктивних класи – клас *активних* турбін і клас *реактивних*, та основна номенклатура типів турбін, що задовольняють потреби сучасності. Із класу активних використовуються лише *ковшові*, а до класу реактивних гідротурбін входять *радіально-осьові*, *осьові поворотно-лопатеві* і *діагональні* турбіни та *пропелерні*.

Здавалося б, що потреба в необхідних типах гідротурбін для всіх зон використовуваних напорів забезпечена існуючим їх рядом. І, отже, компоновка будівлі ГЕС із вертикальною гідротурбиною, що показана на рисунку 1, вважається нормальною і звичною. Але критичний аналіз такої компоновки наштковує на думку, що реактивна турбіна загалом із усіма вузлами займає значно більший будівельний простір своїм проточним трактом, ніж власне двигун (робоче колесо в камері). Традиційна для вертикальних турбін вигнута відсмоктувальна труба вимагає, як видно з рисунку 1, заглиблення масивної частини будівлі даної ГЕС нижче робочого колеса на 23 м, коли робоче колесо має діаметр $D_1 = 10$ м.

Горизонтальні розміри спіральної камери перевищують діаметр робочого колеса в $2,5 \div 3$ рази, а з металевою спіральною камерою (рисунком 2) більш, ніж втричі. Разом ці два фактори визначають мінімально необхідний об'єм будівельного простору, розміри будівлі ГЕС і її вартість. До цього слід додати, що у складі вертикальних реактивних турбін неминуче застосовується досить складний у виготовленні і експлуатації багатолопатковий напрямний апарат Фінка з приводом (рисунком 2).

Існуючим реактивним гідротурбинам властиві також значні гідродинамічні втрати через те, що потік води, рухаючись в складній проточній частині машини, зазнає багатократної деформації.

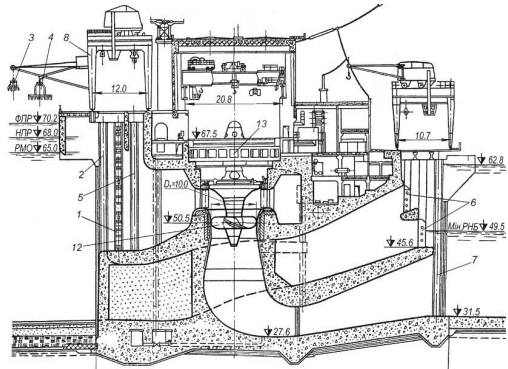
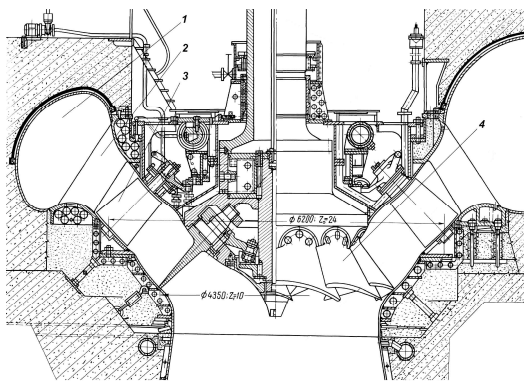


Рис. 1. Будівля низьконапорної ГЕС

У вертикальній осьовій турбіні це – рух в спіральній камері, поворот і проходження між колонами статора і лопатками напрямного апарата, поворот до робочого колеса, вихід з камери робочого колеса, поворот у вигнутій відсмоктувальній трубі та зміна декілька разів форми і площі перетину потоку.



1-спіральна камера; 2-статор турбіни; 3- напрямний апарат; 4-робоче колесо.

Рис. 2. Діагональна поворотно-лопатєва турбіна Бухтармінської ГЕС

Роторно-лопатєва гідравлічна турбіна виникла, як наслідок наведеного вище критичного погляду на властивості існуючих реактивних турбін. Принципово нова гідравлічна машина названа *гідравлічною машиною Самойленка*. На цей винахід одержані Патент України № 56377 від 10.01.2011 і Патент Російської Федерації № 106672 від 20.07.2011.

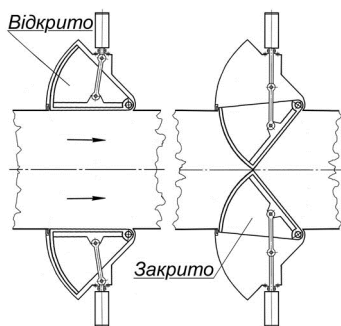


Рис. 3. Секторний напрямний апарат здвоєний

За принципом перетворення енергії потоку в механічну енергію роторно-лопатєва турбіна відноситься до реактивного класу і абсолютно аналогічна до осьової пропелерної турбіни. І в одній і в другій водяний потік підходить до робочого колеса, рухаючись по гвинтовій траєкторії. Не змінюючи практично траєкторії, потік проходить міжлопатєвий простір і обтікає профіль лопатей. При цьому за законами гідродинаміки і у відповідності до Теорій Ейлера і Жуковського вода віддає свою енергію робочому колесу, створюючи обертаючий момент на валу. Але роторно-лопатєва турбіна відрізняється способом підведення потоку до робочого колеса, як видно з рисунку 5.

До вертикальної пропелерної турбіни вода підводиться в радіальній площині, проходячи спіральну камеру, статор і напрямний апарат, і

лише після цього повертає в осьовому напрямку до робочого колеса. А виходить потік з робочого колеса в осьовому вертикальному напрямі, тому для відведення необхідна вигнута відсмоктувальна труба.

У роторно-лопатевої турбіни вода до робочого колеса підводиться дотично до торцевої площини *вхідних* кромek лопатей, а відводиться по дотичній від торцевої площини *вихідних* кромek лопатей. Тому виявилися зайвими спіральна камера і статор, а відсмоктувальна труба завжди пряма при будь-якому розташуванні осі турбіни. Габарити роторно-лопатевої турбіни відносно невеликі і сумірні з діаметром робочого колеса, оскільки турбінна камера є одночасно і камерою робочого колеса.

Для регулювання витрати води через турбіну (потужності) замість багатолопаткового напрямного апарата Фінка застосовано секторний регулятор, винесений за межі власне турбіни. Такий пристрій (традиційно – напрямний апарат) відрізняється від напрямного апарата Фінка тим, що в міру відкриття сектор (або два сектори) виходить із потоку, звільняючи його перетин. У відкритому стані сектор взагалі за межами потоку і не створює йому ніякої перешкоди (рисунок 3). У разі підводу води до турбіни за допомогою круглого трубопроводу можна застосовувати голчастий регулятор, як показано на рисунку 4, з рухомою голкою 1 і приводом 2.

Особливості конструкції роторно-лопатевої гідротурбіни видно з конструктивної схеми гідроагрегата, показаної на рисунку 5. Турбіна, що входить до складу гідроагрегата, включає турбінну камеру 1, яка одночасно є камерою робочого колеса, робоче колесо 2, обмежене циліндричною формою. Робоче колесо складається з лопатей 3, встановлених на ступиці 4 роз'ємно або нероз'ємно. Турбінний вал 5, на якому закріплене робоче колесо, обертається в підшипниках 6 і 7. Осьове навантаження від ваги ротора турбіни і тиску води на лопаті робочого колеса сприймає підп'ятник 8. Секторний напрямний апарат 9, що повертається на шарнірі 10 за допомогою приводу 11, встановлений в напорному водоводі перед входом в турбінну камеру 1. Підводить воду до турбіни напорний водовід 12, а закінчує проточний тракт відсмоктува-

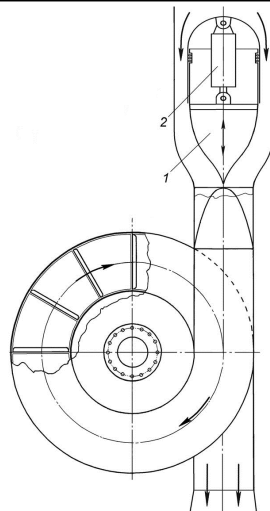


Рис. 4. Турбіна роторно-лопатева з голчастим напрямним апаратом

льна труба 13. Для передачі механічної енергії на генератор 14 застосовано клиноремінний мульти-плікатор 15.

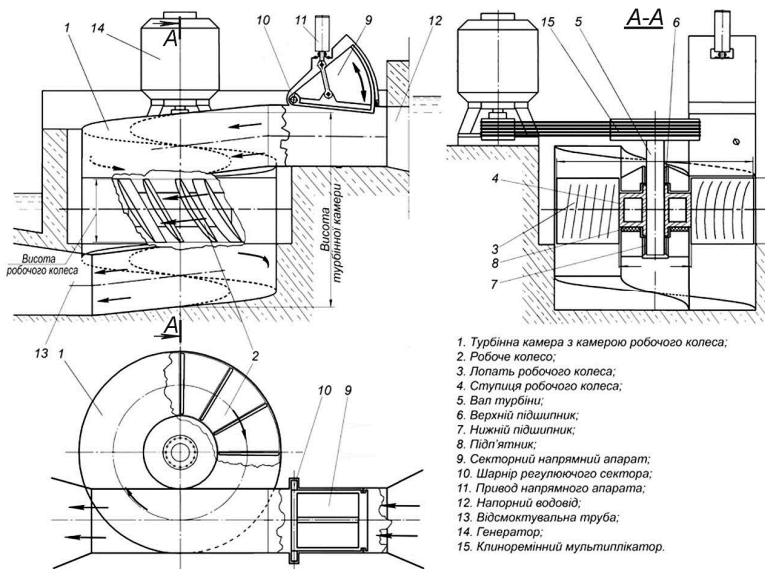


Рис. 5. Конструктивна схема гідроагрегата з роторно-лопатевою турбіною

Значною конструктивною перевагою роторно-лопатевої турбіни є те, що робоче колесо на валу встановлене між двома підшипниками, а це дає високу динамічну надійність машини. У переважній більшості існуючих реактивних машин колесо необхідно встановлювати лише консольно.

Необхідність моделювання роторно-лопатевої турбіни обумовлена тим, що для цієї турбіни не створені багаторічною практикою універсальні та експлуатаційні характеристики, як для існуючих здавна турбін. При розрахунках ту-



Рис. 6. Лабораторна модельна установка з роторно-лопатевою турбіною

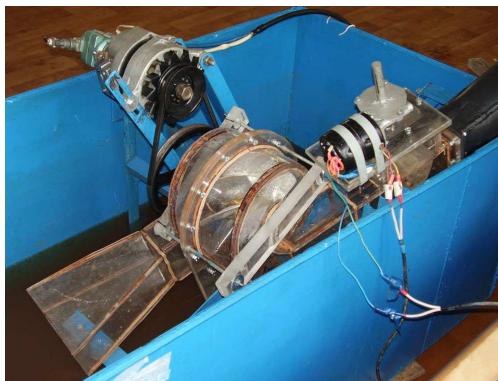


Рис. 7. Модель гідроагрегата з роторно-лопатевою турбіною

но відомою формулою для реактивних турбін через витрату води через турбіну Q , m^3/c ; розрахунковий напор H , m і коефіцієнт корисної дії турбіни η . А решта параметрів визначалися за методикою кардинально відмінною від традиційної.

Виготовлення і випробування моделі здійснено на замовлення Понінківського картонно-паперового комбінату. На рисунках 6 і 7 показано її загальний вигляд, а на рисунку 8 – пульт керування і електричну частину. Мета моделювання полягала у необхідності одержати бодай наближені практичні параметри турбіни, які б дали можливість попередньо оцінити працездатність натурної турбіни. Але природно, що модельна установка вийшла досить недосконалою з багатьох причин.

рбін звичайно користуються формулами подібності і приведеними параметрами, які отримані за результатами ґрунтовних лабораторних досліджень заводської масштабної моделі турбіни. Звичайно, роторно-лопатева турбіна таких досліджень ще не знала.

Потужність роторно-лопатевої турбіни визначається за загаль-

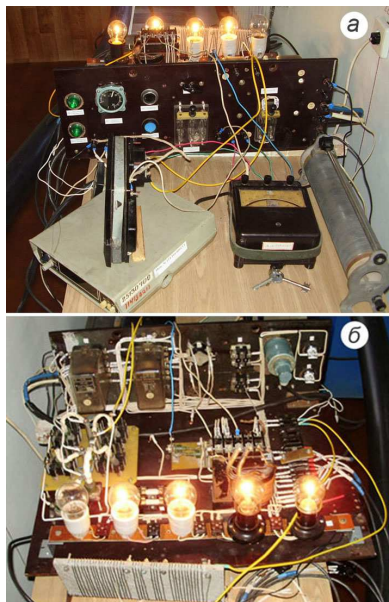


Рис. 8. Пульт керування і електрична частина установки

Складові елементи турбіни виготовлені за примітивною ручною технологією, що не дало можливості витримати необхідні співвідношення розмірів і форми елементів проточного тракту. Особливо це стосується турбінної камери, виготовленої із оргскла (рисунок 9), і лопатей робочого колеса (рисунок 10), які вручну викували із алюмінієвої шини.

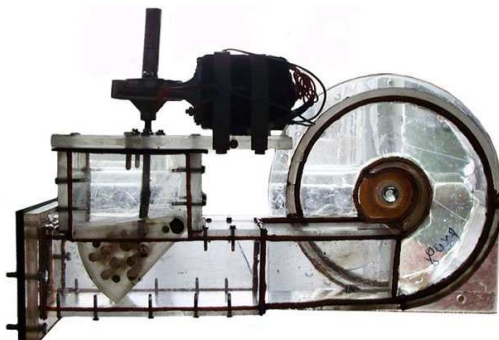


Рис. 9. Турбінна камера із секторним напрямним апаратом

В якості гідрогенератора застосовано реконструйований трифазний автомобільний генератор змінного струму. Це рішення виявилось досить невдалим, оскільки такий генератор потребує високої швидкості обертання (робоча зона від 2500 об/хв), і при цьому його максимальний ККД не перевищує 50 %. А наша низьконапорна турбіна під навантаженням здатна забезпечити лише $n_2 = 1660$ об/хв.

Проте загалом модельна установка виконала завдання, яке перед нею було поставлене. В ході випробувань, що проводилися 2 березня 2011 року, модельна установка показала такі параметри:

- напор на турбіні фактичний $H = 3.18$ м;
- витрата води $Q = 19.3$ л/с $= 0.0193$ м³/с;
- швидкість обертання ротора турбіни $n = 603$ об/хв;
- швидкість обертання ротора генератора $n_2 = 1660$ об/хв;

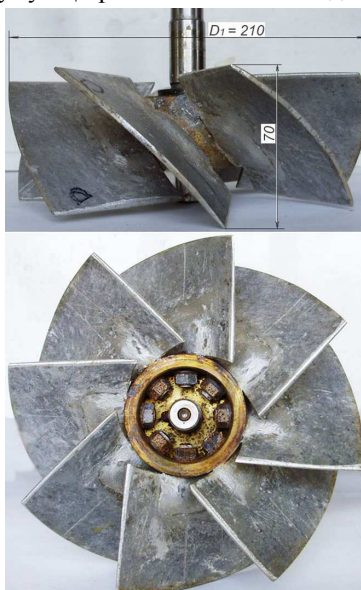


Рис. 10. Робоче колесо

- потужність на виході установки (постійний струм) $N_{вих} = 160 \text{ Вт} = 0,16 \text{ кВт}$;
- потужність генератора (змінний струм) $N_g = 172 \text{ Вт} = 0,172 \text{ кВт}$;
- потужність турбіни $N = 445 \text{ Вт} = 0,445 \text{ кВт}$;
- потужність потоку $N_{ном} = 602 \text{ Вт} = 0,602 \text{ кВт}$;
- коефіцієнт корисної дії турбіни (ККД) $\eta = N / N_{ном} = 0,445 / 0,602 = 0,74$.

Розрахунки параметрів модельної установки виконані за умов, що:

- ККД генератора $\eta_g \approx 0,4$;
- ККД мультиплікатора (клиноремінної передачі) $\eta_m \approx 0,88$;
- ККД випрямляча $\eta_{випр} \approx 0,93$;
- передаточне число мультиплікатора $i = 2,75$.

Результати лабораторних випробувань моделі дали підстави комісії, що проводила випробування (за участі замовника моделі), зробити такі позитивні висновки:

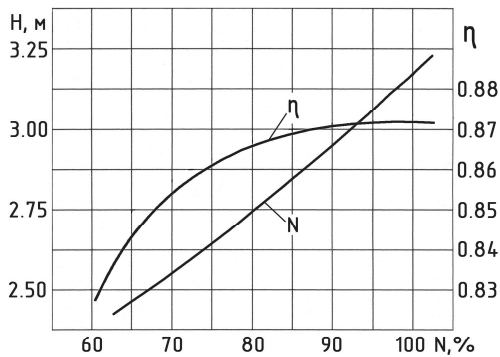
а) Модельна гідротурбіна загалом показала задовільну працездатність;

б) За попередніми розрахунками необхідно виконати корегування кута установки лопатей робочого колеса;

в) Отримані результати випробувань можуть бути прийняті за основу при проектуванні реальної роторно-лопатевої турбіни;

г) Роторно-лопатева гідротурбіна придатна для застосування на малих ГЕС і особливо вдало komponується при малих напорах, але може застосовуватись і для більш високих параметрів потоку.

д) Для вирішення реальності застосування турбіни на більш потужних ГЕС і визначення її приведених параметрів, потрібних при проектуванні конкретних турбін, необхідні ґрунтовні лабораторні або натурні дослідження.



Характеристика моделі роторно-лопастної турбіни с діаметром робочого колеса $D_1 = 0,21 \text{ м}$
 N - залежність потужності турбіни від напора;
 η - залежність ККД турбіни від потужності

Рис. 11. Характеристика роторно-лопатевої турбіни

Надалі, шляхом випробувань моделі при змінних параметрах, вдалося побудувати у першому наближенні характеристику роторно-лопатевої турбіни, що показана на рисунку 11.

Основні переваги роторно-лопатевої гідротурбіни обумовлені особливістю проточного тракту турбіни, характерним складом її вузлів і механізмів, відносно невеликими розмірами у порівнянні з традиційними реактивними турбінами:

- компактність роторно-лопатевої турбіни відкриває великі можливості відновлення покинутих малих ГЕС, реконструкції діючих застарілих із збільшенням їх потужності без порушення будівельної частини;

- відсутність складних вузлів і механізмів обумовлює знижену вартість при виготовленні, простоту і надійність при експлуатації та екологічну чистоту через відсутність гідроприводу в робочому колесі, надійне регулювання витрати води завдяки простоті єдиного регулюючого органа;

- значними конструктивними перевагами є те, що робоче колесо з валом обертається в двох підшипниках, обумовлюючи динамічну надійність на відміну від вертикальних реактивних турбін, в яких колесо обертається консольно в одному підшипнику, що камера робочого колеса має просту циліндричну форму на відміну від сферичної у поворотно-лопатевої турбіни, що напрямний апарат і турбіну (якщо вона вміщується в залізничний габарит) можна відправляти з заводу цілком зібраними і відрегульованими з тим, щоб на місці лише закріпити на фундаменті;

- потік води, проходячи проточним трактом роторно-лопатевої турбіни, зазнає значно менше деформацій, ніж, наприклад, в проточному тракту вертикальної пропелерної турбіни, тобто, менше втрат, а це дає можливість отримати більш високий коефіцієнт корисної дії;

- конструктивна схема роторно-лопатевої турбіни зіставлена так, що всі зношувані вузли і деталі незалежно від положення осі турбіни мають абсолютно вільний доступ для контролю, обслуговування і ремонту без розборки турбіни;

- всі перераховані вище переваги дають одну головну перевагу, що роторно-лопатева турбіна Самойленка, яка належить до реактивного класу, за певних умов буде не менш надійною і більш ефективною, ніж турбіна Френсіса або Калана. Особливо зручною вона може бути при вбудовуванні її в існуючі гідротехнічні споруди.

Характерною особливістю проточного тракту роторно-лопатевої гідравлічної машини є те, що зміна відкриття напрямного апарата, розташованого осторонь від робочого колеса, не завдає значного впливу

на кут входження потоку в міжлопатевий простір.

Завдяки цьому турбіна може працювати надійно і з високим ККД при значних коливаннях напору та змінних режимах.

За попередніми висновками роторно-лопатева турбіна може надійно застосовуватись при напорах 1 ÷ 50 м. Турбіна безумовно зможе працювати і при більш високих напорах, але для цього потрібні ґрунтовні дослідження.



Рис. 12. Технологічна гребля на р. Хомора

Конструкція робочого колеса роторно-лопатевої турбіни дозволяє встановлювати більше лопатей, ніж на колесах осьових турбін, як при малих напорах, так і при більш високих. А це дає можливість створювати турбіни з кращими кавітаційними властивостями.

Перспективи використання роторно-лопатевої гідромашини складно передбачити на даний час. На численні пропозиції, розіслані

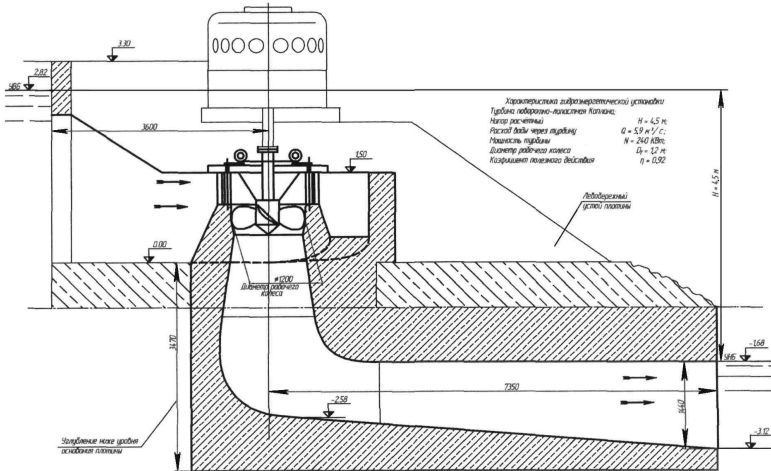


Рис. 13. Варіант мініГЕС на р. Хомора з осовою поворотно-лопатевою турбіною Каплана, $D_1 = 1,2$ м

різними турбінними заводами, відповіді отримано небагато. Чеська Ком-

панія SINK Hydro-Energy, у особі Комерційного директора Ріхарда Хоушка, відповіла згодою на виготовлення роторно-лопатевої турбіни при наявності замовника.

Сизранський завод «ТЯЖМАШ», у особі технічного директора, теж відповів згодою на виготовлення турбін при наявності замови на 3 турбіни.

В поточному році встановлено зв'язок з Єрванською компанією «Хорда», яка сумісно з Саратовською генераторною компанією виготовляє гідроагрегати для малих ГЕС Росії і Вірменії. Керівництво Компанії відповіло згодою на виготовлення роторно-лопатевої турбіни і представило параметри річки (своїє, з напором 22 м) та наявного генератора із проханням розробити конструкцію турбіни. Конструкція розроблена на стадії ескізного проекту і відправлена «Хорді». Відповідь чекаємо.

Одним з перших потенційних замовників роторно-лопатевої турбіни є Поніківський картонно-паперовий комбінат, до складу якого входить технологічна гребля на р. Хомора, показана на рисунку 12. Гребля досить зручна для встановлення мініГЕС, але за вимогами екологів обладнання, яке буде встановлене, не повинно виходити за межі греблі. Середня потужність потоку в створі греблі складає 260 *KWm*.

На замовлення комбінату виконані проектні проробки мініГЕС в двох варіантах: із турбіною Каплана, що пропонують європейські компанії, і з роторно-лопатевою турбіною.

Варіант мініГЕС із турбіною Каплана показано на рисунку 13. Вертикальна поворотно-лопатева гідротурбіна, яку пропонує Чеська ком-

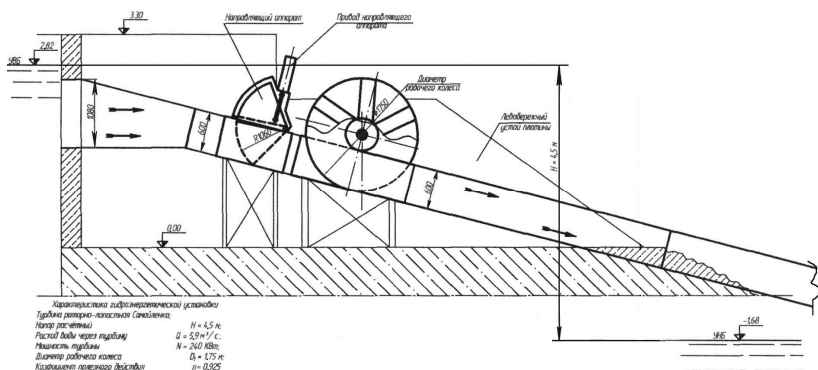


Рис. 14. Варіант мініГЕС на р. Хомора із роторно-лопатевою турбіною Самойленка, $D_1 = 1,75$ м

панія SINK, за розрахунками повністю задовольняє улаштування малої

ГЕС із напором $H = 4.5$ м і потужністю $N = 240$ КВт при діаметрі $D_1 = 1.2$ м. Але, вирішуючи питання вибору варіанта турбіни, необхідно врахувати і те, що наявність у складі турбіни об'ємної турбінної камери і вигнутої відсмоктувальної труби вимагає виконання значного об'єму бетонних робіт із заглибленням в основу греблі на 3.63 м, як видно з рисунку. А за умов, що гребля постійно сприймає напор технологічного басейну, порушення її основи неприпустиме.

На рисунку 14 представлено варіант мініГЕС з роторно-лопатевою турбіною. За параметрами турбіна аналогічна до турбіни Каплана. При діаметрі $D_1 = 1.75$ м розвиває потужність $N = 240$ КВт. Але МініГЕС вільно розміщується в лівобережному прольоті греблі, рисунок 12, не потребує значних бетонних робіт і лишеяє непорушною основою греблі.

Можливий напрям використання роторно-лопатевої турбін – каскади малих ГЕС у верхів'ях річок Тиси і Дністра, для яких передбачаються невисокі напори і водосховища невеликих об'ємів в межах русел. Другий напрям – відбудова численних покинутих малих ГЕС. Для такої мети, як ніде, доцільно застосовувати компактні гідроагрегати із горизонтальними роторно-лопатевою турбінами, такі, як показано на рисунку 14. Гідроагрегати з такою компоновкою цілком вміщуються в межі невисокої греблі і не потребують будівництва машинних приміщень. А для їх обслуговування можна застосовувати мобільні вантажопідйомні засоби.

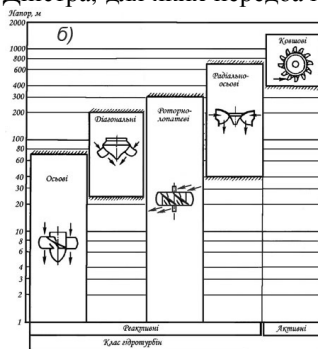


Рис. 15. Зони застосування турбін (майбутній варіант)

Прикладом можливого застосування роторно-лопатевої турбіни є проектна проробка *Каховської ГЕС-II*. Розширення Каховської ГЕС – питання недалекого майбутнього, оскільки ця станція стала вузьким місцем в ланцюгу Дніпровського каскаду. Для розширення передбачається використати зайві на даний час прольоти водозливної греблі. Одним з важливіших питань при цьому є вибір компоновочної схеми будівлі ГЕС і гідроенергетичного обладнання.

Варіант наближеної проектної проробки передбачає використання для однієї турбіни витрати з одного водозливного прольоту. Роторно-лопатева турбіна з діаметром робочого колеса $D_1 = 7,1$ м при вертикальній конструктивній схемі здатна розвивати потужність до

$N = 26$ МВт. При цьому для улаштування масивної частини будівлі ГЕС немає необхідності заглиблюватись в дно Дніпра.

Висновки:

- роторно-лопатева гідравлічна машина (гідротурбіна) Самойленка, на яку отримані Патенти України і Російської Федерації, відповідає сучасним вимогам до гідроенергетичного обладнання ГЕС;
- завдяки своїм властивостям гідротурбіна, за певних умов, може конкурувати з існуючими реактивними турбінами;
- деякі провідні турбобудівні заводи вже на даний час можуть виготовити роторно-лопатевої гідротурбіни при наявності замовлень;
- роторно-лопатева турбіна може ефективно використовуватись при будівництві ГЕС на численних малих річках України і при відбудові покинутих малих ГЕС;
- для визначення місця роторно-лопатевої турбіни в номенклатурі існуючих турбін необхідні ґрунтовні натурні та модельні дослідження.

1. Васильев Ю. С., Хирсанов Н. И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. – Л. : Энергоиздат, 1991. 2. Самойленко Є. Г. Гідроенергетичне обладнання гідро- та гідроакумулюючих електростанцій. – З. : ЗДІА, 2006. 3. Барліт В. В. Гідравлічні турбіни і насоси-турбіни. – К. : ІЗМН, 1998.

Рецензент: д.т.н., професор Пазюк М. Ю. (Запорізька державна інженерна академія)

Samojlenko E. G., Associate Professor (Zaporizhzhya College of Hydropower Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya)

FUNDAMENTALLY NEW ROTARY-BLADE HYDRAULIC TURBINES

Results of the analysis of sequence of creation of water-wheels and research of influence of properties of turbines on configuration of hydraulic engineering constructions are given. Turbines and the characteristic of its design are stated the principle of action rotor-blade. Results of laboratory researches of model of the turbine are shown. Use prospects are considered rotor-blade turbines.

Keywords: turbine, capacity, driving wheel, blades, turbine camera, HPS building.

Самойленко Е. Г., доцент (Запорожский гидроэнергетический колледж Запорожской государственной инженерной академии, г. Запорожье)

ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВАЯ РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

Приведены результаты анализа последовательности создания гидротурбин и исследования влияния свойств турбин на компоновку гидротехнических сооружений. Изложены принцип действия роторно-лопастной турбины и характеристика её конструкции. Показаны результаты лабораторных испытаний модели турбины. Рассмотрены перспективы использования роторно-лопастной турбины.

Ключевые слова: турбина, мощность, рабочее колесо, лопасти, турбинная камера, здание ГЭС.
