

О.Л. Пальченко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

АНАЛІЗ БІОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБІНИ ФРЕНСІСА, МОДЕРНІЗОВАНОЇ МОДУЛЬНОЮ НАПРАВЛЯЮЧОЮ ЛОПАТКОЮ

На ряді гідроелектростанцій було проведено низку досліджень для вивчення турбіни Френсіса, модернізованої за допомогою модульної лопатки. Випробування показали, що модульна напрямна лопатка, встановлена в модернізованій турбіні Френсіса, є потенційною заміною. Вона може забезпечувати біологічні характеристики, аналогічні характеристикам напрямних лопаток, що використовуються в інших турбінах Френсіса і скорочує витрати на виготовлення.

Ключові слова: гідроенергетична турбіна, модульна напрямна лопатка, Sensor Fish.

Постановка проблеми

Гідроенергетика є найбільшим відновлюваним джерелом енергії у світі, із встановленою потужністю 1 114 ГВт на кінець 2017 року, що становить понад 50% усієї відновлюваної енергії у світі [1]. У Європі на традиційну гідроенергетику припадає близько 59% відновлюваної енергії [2], у Сполучених Штатах (США) – понад 50% [3], а в Україні – 8% від загальної потужності об'єднаної енергетичної системи країни, що у середньорічному виробітку електроенергії гідроелектростанціями дорівнює 10,8 млрд кВт·год [4].

Незважаючи на те, що традиційна гідроенергетика залишається найбільшим джерелом відновлюваної енергії, темпи її подальшого розвитку нижчі, ніж у інших видів відновлюваної енергії, таких як вітрова та сонячна.

У той час як у Південній Америці [5] та Азії [6] здійснювалося нове будівництво великих гідроелектростанцій, у Північній Америці та Європі переважно зосереджено на малих ГЕС (МГЕС). Розширення використання МГЕС вимагатиме проведення досліджень та розробок нових інноваційних технологій та проектних підходів, щоб зробити їх економічно ефективними та забезпечити стійке впровадження. Один із способів досягнення цієї мети – розробка стандартизованих та модульних компонентів за принципом «plug-and-play». Такі стандартизовані та модульні компоненти дозволять зменшити загальні витрати на проекти порівняно з традиційними індивідуальними конструкціями, адаптованими під конкретну ділянку. Це зробить економічно вигідними багато низьконапірних гідроенергетичних об'єктів, які раніше не були рентабельними [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нещодавною значною зміною у розвитку МГЕС у США стало дослідження концепції Стандартної модульної гідроенергетики (SMH). У таких гідроенергетичних об'єктах використовуються стандартизовані модулі, які виконують окремі функції, можуть працювати незалежно або у взаємодії один з одним, що сприяє зниженню витрат та підвищенню екологічної сумісності [8].

До складу SMH-установки можуть входити різні модулі, включаючи фундаментні, генеруючі та пропускні модулі.

Фундаментні модулі запобігають зміщенню та перекиданню інших модулів.

Генеруючий модуль відповідає за вироблення електроенергії.

Пропускні модулі регулюють мінімальний та паводковий стік, а також можуть використовуватися для пропуску риб, наносів, суден та сміття залежно від характеристик об'єкта.

Генеруючі модулі включають робоче колесо турбіни, напрямні лопатки, генератор і будівлю електростанції. Оскільки економіка гідроелектростанції багато в чому залежить від ефективності генерації, значні зусилля спрямовані на вдосконалення технологій.

Вибір робочого колеса турбіни залежить від гідравлічних характеристик ділянки, таких як діапазон робочого напору та об'ємна витрата води.

Серед традиційних турбінних конструкцій можна виділити турбіни Френсіс [9], Каплан [10], Пелтон [11], Турго [12], поперечного потоку (crossflow) [13].

Ці конструкції поділяються на дві основні категорії:

– ударні (імпульсні) турбіни (наприклад, Пелтон, Турго, поперечного потоку), де енергія води перетворюється на швидкість, а потім передається робочому колесу через струмінь, що ударає по

ковшах; ці турбіни зазвичай використовуються на ділянках з високим напором та малою витратою води;

– реактивні турбіни (наприклад, Френсіс, Каплан), де робоче колесо повністю занурене у воду та обертається за рахунок тиску та швидкості потоку; ці турбіни ефективні при низьких напорах та високих витратах води.

Крім традиційних турбінних конструкцій, на ринку з'являються нові нестандартні рішення. Серед них:

– турбіна Архімеда [14], заснована на принципі Архімедового гвинта, який зазвичай використовується для підйому рідин або твердих частинок на більш високий рівень;

– лінійна турбіна Пелтона від Natel Energy [15] є адаптацією турбіни Пелтона, але розробленої для модульності, роботи на низьких напорах і підвищення безпеки для риб.

Мета статті

Стаття має на меті проаналізувати новітні дослідження, проведені в цій області різними дослідниками для різних компонентів турбін гідроелектростанцій.

Виклад основного матеріалу

При проектуванні генераторних модулів для SMH важливо враховувати компроміс між різними пріоритетами. Наприклад, Чен та Енгед [16] описали розробку генераторного модуля для низьконапірних установок, заснованого на турбіні типу Каплан. Вони відзначають, що традиційний підхід до проектування турбіни для низьконапірних ділянок передбачає використання невеликого робочого колеса з швидкістю обертання. Однак це суперечить меті SMH зі зниження смертності риб і вимагає розробки нових, більш екологічно безпечних конструкцій турбін.

Гідроелектростанції повинні забезпечувати пропуск води в обхід турбін з різних причин. Це включає підтримку мінімального стоку вниз за течією для запобігання екологічним порушенням, а також можливість безпечного пропускання води у разі паводків. Ці завдання традиційно вирішуються за допомогою водоскидів, водозливів та інших випускних споруд. У класичній конструкції для цього використовуються потужні бетонні споруди, що не відповідає філософії Стандартної модульної гідро-енергетики (SMH). Один із способів зменшення об'єму бетону та трудовитрат при будівництві водоскидів або водозливів – це використання конструкцій із затворами, які управляються надувними гумовими балонами, закріпленими на бетонній основі [17].

Ще однією важливою метою пропуску потоків, що не генерують, є забезпечення безпечного проходу риби вниз за течією. Для того щоб збалансувати виробництво електроенергії з безпечним проходом риби, необхідно враховувати як характеристики цільових видів риб, так і гідравлічні характеристики турбіни, що встановлюється. З появою інноваційних конструкцій «дружніх до риби» турбін [18] їх використання може стати сприятливим способом пропуску риби на деяких гідроелектростанціях. Вивчаючи характеристики як риб, так і турбін, можна приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності застосування рибозахисних решіток, спеціальних водозливів або інших споруд для безпечного проходження риби. Це дозволить створити гідроенергетичну установку, що забезпечує стійке джерело відновлюваної енергії.

Під час проходження через турбіну риби можуть піддаватися різним видам травм, спричиненим: різкою декомпресією, ударом об лопату турбіни, зіткненням з нерухомими конструкціями, подрібненням між рухомими та нерухомими частинами, зсувними навантаженнями, кавітацією, турбулентністю потоку [18].

Під час проходження через реактивну турбіну риба може піддаватися швидкій декомпресії, оскільки вона проходить із зони високого тиску вгору потоком в зону низького тиску за робочими лопатками турбіни. Крім декомпресії, під час проходження через турбіну риба може битися об лопаті робочого колеса. Імовірність удару залежить від параметрів потоку, розміру риби, а також розмірів та геометрії компонентів турбіни. Крім того, риби можуть стикатися з нерухомими конструкціями, такими як напрямні лопатки, вал робочого колеса або стінки труби, що відводить. Якщо риба проходить через вузькі зазори, наприклад між лопаткою турбіни і її корпусом, вона може піддаватися подрібненню. Риби також можуть зазнавати зсувних навантажень, якщо проходять через зони, де зустрічаються потоки води з різними швидкостями. Якщо тиск на виході з турбіни падає нижче тиску насиченої пари води, виникає кавітація – процес утворення та подальшого схлопування бульбашок, що може створити ударні хвилі, що завдають травм рибі та ушкоджують компоненти турбіни. Нарешті, турбулентні потоки, що проходять через напрямні лопатки, робоче колесо і трубу, що відводить, можуть викликати у риби дезорієнтацію, зниження здатності до плавання, втрату рівноваги і збільшення споживання кисню [18].

Крім розробки стандартизованих та модульних компонентів у форматі «plug-and-play», ще однією стратегією, що дозволяє зробити розвиток малої

гідроенергетики (SHP) більш економічно ефективним та екологічно стійким, є використання сучасних інструментів для прискорення, покращення та здешевлення екологічних оцінок. Одним з таких інструментів є Sensor Fish [19] – невеликий автономний сенсорний прилад з нейтральною плавучістю, призначений для збору даних про силові дії та рух за допомогою різних датчиків у реальних умовах. Компоненти пристрою розміщені так, щоб його центр ваги збігався з геометричним центром, що дозволяє йому вільно йти за потоком води з мінімальним обертанням. Sensor Fish (рис.1) застосовується для вивчення вразливості різних видів риб до факторів, що травмують, а також для дослідження гідравлічних характеристик турбін.

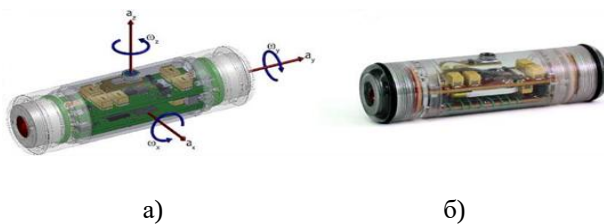


Рис. 1. Зображення сенсора Fish Gen 2:

а) комп'ютерне проектування, що показує систему координат; б) фотографія [19]

У пристрій входять:

- датчик тиску – для вимірювання швидких стрибків тиску, що виникають при проходженні через турбіну;
- триосьовий акселерометр – для вимірювання лінійних прискорень у трьох вимірах (3D);
- триосьовий гіроскоп – для вимірювання кутових швидкостей обертання (3D);
- триосьовий магнітометр – визначення напрямку орієнтації у просторі магнітного поля Землі;
- датчик температури.

Усі сенсори Sensor Fish вимірюють із частотою 2048 Гц. Максимальна тривалість запису становить близько 4,8 хвилини.

Перед розгортанням у польових умовах кожен Sensor Fish проходить калібрування в лабораторних умовах.

Випробування з Sensor Fish проводилися 25–26 березня 2019 року на ГЕС Херлі, що розташована на річці Літл-Рівер у штаті Північна Кароліна, США (рис. 2).

На ГЕС Херлі є три гідроагрегати, але в даний час експлуатується лише один. У першому агрегаті встановлено турбіну Francis, розроблену компанією S. Morgan Smith (нині Voith Hydro). Ця турбіна працює у радіальному відкритому каналі, де напрямний апарат встановлений у відкритому

каналі, а не в спіральній камері. Турбіна має діаметр 0,76 м і обертається зі швидкістю 400 об/хв за максимального ККД.



Рис. 2. Супутниковий знімок, що показує розташування греблі Херлі (35.286691 °, -79.894578 °), розташованої приблизно в 8 км на південь від Трою, Північна Кароліна.

Дана турбіна була модернізована з використанням модульного напрямного апарату, розробленого для модульної осевої турбіни серії PROPEL 92 (Kaplan-тип). Перевага такого напрямного апарату – модульна конструкція, яка скорочує час та витрати на виготовлення порівняно з традиційними напрямними апаратами.

Замість складних литих елементів напрямний апарат збирається із модульних вузлів, які легко з'єднуються. Аналогічна конструкція буде використовуватися в 12 турбінах, що плануються до встановлення на греблі Херлі та інших гідроелектростанціях.

Браун та ін [20] використовували дані тиску Sensor Fish при проходженні через турбіну, щоб запрограмувати спеціальні барокамери (гіпо/гіпербаричні камери) для моделювання умов проходження через турбіну [21]. Ці випробування дозволили встановити залежність між тиском надиру (найменшим тиском, який відчуває риба) та смертельними травмами.

Крім вивчення баротравм, лабораторні експерименти проводилися з метою оцінки впливу зсувних навантажень, і навіть удару про лопаті турбіни.

Річмонд та ін [22] встановили, що вимірює Sensor Fish прискорення є найбільш точним предиктором ймовірності травм, викликаних зсувними навантаженнями, та використовували отримані дані для розробки дозовідповідальних залежностей [23].

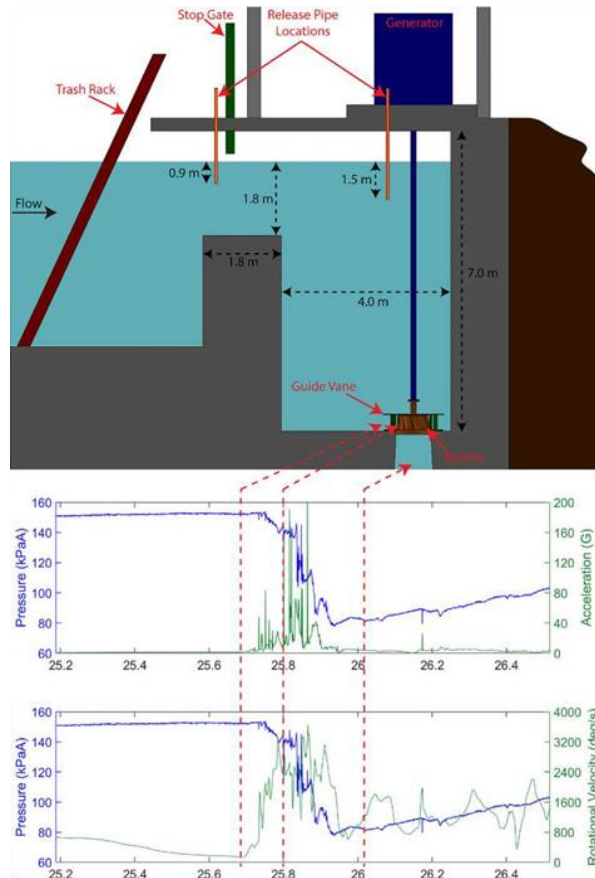


Рис. 3. Приклад проходження Sensor Fish через турбіну Френсіса на греблі Херлі. Показано

мітки часу встановлюються на межі різних зон, виходячи з характерних ознак даних, а саме: зона водозабору турбіни, зона направляючого апарату, зона робочого колеса, зона відсмоктуючої труби. Такий аналіз допомагає детально зрозуміти поведінку Sensor Fish у різних зонах турбіни, що важливо для оцінки ризиків та оптимізації конструкції турбін з точки зору безпеки для риби. При проходженні через реактивну турбіну різке (рис. 3) зниження тиску в зоні робочого колеса може призвести до баротравматичних пошкоджень. Ймовірність смертельної травми (миттєвої загибелі або травми, здатної призвести до загибелі, такої як екзофтальм (витріщання очей), крововиливу в перикард, печінки або нирки, розрив плавального міхура, кров'яні виділення з анального отвору або газові емболії в жабрах або плавниках попаданням у турбіну).

Якщо тиск надіру вищий за атмосферний, ймовірність баротравми незначна. Якщо тиск надіру нижчий за атмосферний (як на Hurley Dam), ймовірність смертельного пошкодження ненульова. Результати Hurley Dam були зіставлені з низкою інших ГЕС, що використовують турбіни Френсіса [24] та низьконапірну сифонну турбіну з робочим колесом Каплана [25] у Тихоокеанському Північному Заході США, а також з ГЕС у Лаосі [26]. Тиск надіру на більшості ГЕС з турбінами Френсіса (крім Nam Ngum в Лаосі) і на ГЕС з сифонною турбіною були значно нижчими від атмосферного

Таблиця 1

Зіставлення даних, одержаних на Hurley Dam з даними, отриманими на інших гідроелектростанціях

приблизні розташування у даних щодо фізичних місць

Аналіз даних, зібраних за допомогою Sensor Fish, починається з ручного поділу даних на різні зони проходження шляхом уважного вивчення часових рядів тиску, прискорення та кутової швидкості. За допомогою комплексу програмних інструментів створюються відповідні графіки та

(табл. 1).

Для кожного випуску Sensor Fish були ідентифіковані випадки сильних прискорень (>95 G), які класифікувалися як наслідок зіткнення/удару або зсуву.

Зіткнення та/або удари спостерігалися в наступних зонах при всіх режимах роботи: напрямний апарат, робоче колесо, відсмоктуюча труба.

Passage Region	Event Type	Hurley Dam			Nam Ngum Dam		Arrowrock Dam	Detroit Dam	Cougar Dam			Head of the U Dam
		90 kW	190 kW	380 kW	Unit 1	Unit 4			Minimum Opening	Maximum Opening	Peak Efficiency	
Guide vane	Strike	64%	50%	55%	60%	32%	80%	32%	25%	33%	25%	12%
	Shear	0%	0%	0%	3%	0%	20%	5%	0%	0%	0%	0%
Runner	Strike	73%	78%	80%	37%	32%	60%	42%	75%	100%	25%	47%
	Shear	0%	0%	10%	3%	16%	20%	100%	100%	100%	100%	2%
Draft tube	Strike	9%	28%	10%	0%	5%	0%	11%	25%	0%	0%	0%
	Shear	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%
All	Strike	100%	89%	95%	90%	58%	100%	84%	75%	100%	50%	52%
	Shear	0%	0%	10%	7%	16%	40%	100%	100%	100%	100%	2%

Найбільша частка випусків із хоча б одним сильним прискоренням була зафіксована у робочому колесі (від 73% до 78%), при цьому частота збільшувалася зі зростанням потужності генерації.

Наступною частотою була зона направляючого апарату (50–64% випусків), але чіткої залежності від рівня генерації не спостерігалось.

Найменша частота сильних прискорень спостерігалася в трубі, що відсмоктує (9–28% випусків), також без чіткої залежності від потужності.

Відповідність Sensor Fish реальним риbam

Sensor Fish був розроблений для аналізу фізичних умов, з якими стикається риба, проходячи через гідротехнічні споруди та складні потоки.

На відміну від Sensor Fish, жива риба може маневрувати, уникаючи зіткнень за певних гідравлічних умов.

Однак при сильних турбулентних потоках риба не здатна реагувати так само швидко, і тоді її можна розглядати як нейтрально плавучу частинку, подібну до Sensor Fish.

При дії зсуву та зіткнень механізм травми сильно впливає на рівень ушкоджень:

– якщо риба входить у зону зсуву головою вперед, травми будуть серйознішими, ніж хвостом вперед [27];

– якщо зіткнення посідає голову, ймовірність травми вище, ніж за зіткнення хвостом [28].

В результаті Sensor Fish фіксує більше випадків сильних прискорень, ніж реальний рівень травматизму риб. Однак його дані корисні для оцінки гідравлічних умов та потенційної біологічної безпеки споруд.

Висновки

Турбіни Френсіса є найпоширенішими у світі. У міру старіння обладнання багато турбін вимагатиме модернізації.

Для аналізу енергетичних характеристик модульної PROPEL-Turbine зазвичай використовувалися традиційні методи оцінки турбін, які дозволяють повною мірою дати оцінку «дружності турбіни до риби».

Застосування технології Sensor Fish дозволяє:

– оцінити біологічні характеристики турбіни, а не лише параметри виробітку електроенергії;

– виявити, які конструктивні та експлуатаційні фактори впливають на рибу;

– створити еталонні дані для порівняння PROPEL-Turbine у тих самих умовах.

Випробування на Hurler Dam показали, що:

– модульний напрямний апарат є адекватною заміною традиційних аналогів;

– біологічну безпеку модернізованого апарату можна порівняти з існуючими турбінами Френсіса;

– використання модульних стандартних компонентів дозволяє: скоротити час та витрати на виробництво запасних частин; мінімізувати втрати доходів через зупинку турбіни на ремонт; поетапно дослідити вплив різноманітних конструкцій турбін на рибу.

За наявності доступного фінансування та передових технологій, що забезпечують баланс між економікою, ефективністю та екологічною стійкістю, потенціал розширення використання МГЕС, що особливо концептуально знижують вплив на навколишнє середовище, потребуватиме проведення досліджень та розробок нових інноваційних технологій та проектних підходів. Один із способів досягнення цієї мети – розробка стандартизованих та модульних компонентів за принципом «plug-and-play». Такі стандартизовані та модульні компоненти дозволять зменшити загальні витрати на проекти порівняно з традиційними індивідуальними конструкціями, адаптованими під конкретну ділянку. Це зробить економічно вигідними багато низьконапірних гідроенергетичних об'єктів, які раніше не були рентабельними [7].

На сьогоднішній день в Україні в експлуатації перебуває понад 100 малих ГЕС, сумарна потужність яких становить близько 100 МВт. Україна має значний потенціал розвитку малої гідроенергетики, оскільки її територією протікає понад 60 тисяч невеликих річок. Малі ГЕС в Україні здатні генерувати до 3 мільярдів кВт*год електроенергії. На сьогоднішній день частка електроенергії, яку генерують малі ГЕС, становить лише 0,18% загального виробництва електрики в країні. Водночас, «Енергетична стратегія України до 2035 року» передбачає, що на малі ГЕС припадатиме до 25% усієї електрогенерації. Найбільший потенціал розвитку посідає Карпатський регіон.

References

1. Sawin JL, Rutovitz J, Sverrisson F. *Renewables 2018: Global status report*; 2018.
2. Mennel T, Ziegler H, Ebert M, Nybø A, Oberrauch F, Hewicker C. *The hydropower sector's contribution to a sustainable and prosperous Europe. Main report. DNV-GL, on behalf of: A European hydropower Initiative of hydropower companies and supported by associations, Bonn, Germany*; 2015.
3. (USDOE) U.S. Department of Energy. *Hydropower Vision*. URL: <https://www.energy.gov/eere/water/new-vision-united-states-hydropower> (дата звернення: 03.02.2025).
4. ІПАТ «Укргідроенерго» URL: <https://uhe.gov.ua/> (дата звернення: 03.02.2025).
5. Fearnside PM. *Dams in the Amazon: Belo Monte and Brazil's hydroelectric development of the Xingu River Basin*. *Environ Manage* 2006;38(1):16.

<https://doi.org/10.1007/s00267-005-0113-6>

6. Fan Q, Zhou S, Yang N. Optimization design of foundation excavation for Xiluodu super-high arch dam in China. *J Rock Mech Geo Eng* 2015;7(2):120–35.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.001>

7. Zhou D, Deng ZD. Ultra-low-head hydroelectric technology: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:23–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.086>

8. Witt A, Smith BT, Tsakiris A, Papanicolaou T, Lee K, Stewart KM. Exemplary design envelope specification for standard modular hydropower technology; 2017.

9. Choi HJ, Zullah MA, Roh HW, Ha PS, Oh SY, Lee YH. CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine. *Renew Energy* 2013;54:111–23.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.049>

10. Yang W, Wu Y, Liu S. An optimization method on runner blades in bulb turbine based on CFD analysis. *Sci China: Technol Sci* 2011;54(2):338–44.

<https://doi.org/10.1007/s11431-010-4261-4>

11. Zidonis A, Aggidis GA. State of the art in numerical modelling of Pelton turbines. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:135–44.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.037>

12. Williamson SJ, Stark BH, Booker JD. Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine. *Appl Energy* 2013;102:1114–26.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.029>

13. Sammartano V, Aricò C, Carravetta A, Fecarotta O, Tucciarelli T. Banki-Michell optimal design by computational fluid dynamics testing and hydrodynamic analysis. *Energies* 2013;6(5):2362–85.

<https://doi.org/10.3390/en6052362>

14. Lisicki Michal, Lubitz William, Taylor Graham W. Optimal design and operation of Archimedes screw turbines using Bayesian optimization. *Appl Energy* 2016;183:1404–17.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.084>

15. Schneider AD. Natel Energy Inc. Linear Pelton turbine. U.S. Patent Application 10/ 221,830; 2019.

16. Chen J, Engeda A. Standard module hydraulic technology: A novel geometrical design methodology and analysis for a low-head hydraulic turbine system, Part I: General design methodology and basic geometry considerations. *Energy* 2020;196:117151.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117151>

17. Obermeyer HK. OBERMEYER HYDRO Inc. Water control gate and actuator therefore. U.S. Patent 7,114,879; 2006.

18. Cada GF. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries* 2001;26(9):14–23.

<https://doi.org/10.2172/1218168>

19. Deng ZD, Lu J, Myjak MJ, Martinez JJ, Tian C, Morris SJ, et al. Design and implementation of a new autonomous Sensor Fish to support advanced hydropower development. *Rev Sci Instrum* 2014;85(11):115001.

<https://doi.org/10.1063/1.4900543>

20. Brown RS, Carlson TJ, Gingerich AJ, Stephenson JR, Pflugrath BD, Welch AE, et al. Quantifying mortal injury of

juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydroturbine passage. *Trans Am Fish Soc* 2012;141(1):147–57.

<https://www.doi.org/10.1080/00028487.2011.650274>

21. Stephenson JR, Gingerich AJ, Brown RS, Pflugrath BD, Deng Z, Carlson TJ, et al. Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. *Fish Res* 2010;106(3):271–8.

<https://www.doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.006>

22. Richmond MC, Deng Z, McKinstry CA, Mueller RP, Carlson TJ, Dauble DD.

<http://dx.doi.org/10.1139/f05-091>

23. Response relationships between juvenile salmon and an autonomous sensor in turbulent flow. *Fish Res* 2009;97(1–2):134–9.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2009.01.011>

24. Fu T, Deng ZD, Duncan JP, Zhou D, Carlson TJ, Johnson GE, et al. Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renew Energy* 2016;99:1244–52.

<https://www.doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.029>

25. Martinez JJ, Deng ZD, Klopries EM, Mueller RP, Titzler PS, Zhou D, et al. Characterization of a siphon turbine to accelerate low-head hydropower deployment. *J Clean Prod* 2019;210:35–42.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.345>

26. Martinez J, Deng ZD, Tian C, Mueller R, Phonekhampheng O, Singhanouvong D, et al. In situ characterization of turbine hydraulic environment to support development of fish-friendly hydropower guidelines in the lower Mekong River region. *Ecol Eng* 2019;133:88–97.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.028>

27. Neitzel DA, Dauble DD, Cada GF, Richmond MC, Guensch GR, Mueller RP, et al. Survival estimates for juvenile fish subjected to a laboratory-generated shear environment. *Trans Am Fish Soc* 2004;133(2):447–54.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.05.019>

28. Bevelhimer MS, Pracheil BM, Fortner AM, Saylor R, Deck KL. Mortality and Injury Assessment for Three Species of Fish Exposed to Simulated Turbine Blade Strike. *Can J Fish Aquat Sci* [Published online 2019].

<https://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0386>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., головний радник голови правління О.І. Вайнберг, ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», Україна.

Автор: ПАЛЬЧЕНКО Олег Леонідович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – Oleg.Palchenko@kname.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3809-3148>

ANALYSIS OF THE BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A FRANCIS TURBINE MODERNIZED WITH A MODULAR GUIDE VANE

O. Palchenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

There are two strategies to reduce the overall project costs to a level that would make many potential sustainable hydropower projects economically viable:

1. Designing standard/modular components.

2. Utilizing advanced tools to reduce the costs of environmental assessment.

Several studies have been conducted at various hydropower plants using an autonomous sensor device (Sensor Fish) to examine a Francis turbine modernized with a modular guide vane. A series of average minimum pressures were measured under different operating conditions during the experiments. These values were compared with data obtained for other Francis turbines installed at different hydropower plants using Sensor Fish. The experimental data from multiple hydropower plants fell within the same range, emphasizing their reliability.

Additionally, the tests demonstrated that the modular guide vane installed in the modernized Francis turbine is a potentially suitable replacement. It can provide biological characteristics comparable to those of guide vanes used in other Francis turbines, while also offering the advantage of reduced manufacturing costs.

Hydropower is the largest renewable energy source in the world, with an installed capacity of 1,114 GW as of the end of 2017, accounting for more than 50% of all renewable energy globally.

In Europe, traditional hydropower makes up about 59% of renewable energy, while in the United States (USA), it accounts for more than 50%. In Ukraine, hydropower represents 8% of the total capacity of the country's unified energy system, with an average annual electricity generation by hydropower plants of 10.8 billion kWh.

Despite the fact that traditional hydropower remains the largest renewable energy source, its growth rate is lower compared to other renewable energy sources, such as wind and solar power.

While new large hydropower plants were being constructed in South America and Asia, North America and Europe primarily focused on small hydropower plants (SHPs).

The expansion of SHP usage will require research and development of new innovative technologies and design approaches to make them economically viable and ensure their sustainable implementation. One way to achieve this goal is the development of standardized and modular components based on the "plug-and-play" principle.

Such standardized and modular components will help reduce overall project costs compared to traditional custom-designed structures adapted to specific sites. This approach will make many low-head hydropower projects, which were previously unprofitable, economically feasible.

Keywords: hydropower turbine, modular guide vane, Sensor Fish.