

О.Л. Пальченко

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна***КАВІТАЦІЙНА ЕРОЗІЯ В ТУРБІНАХ ФРЕНСІСА**

*У роботі аналізуються найновіші дослідження, проведені різними дослідниками в області кавітаційної ерозії для різних компонентів гідротурбін. Аналіз показує, що цей тип ерозії залежить від характеристик потоку, поверхні та властивостей матеріалу, що еродує. Інструменти оптимізації конструкції, кавітаційної ерозії, а також добре проведені експерименти дадуть результати, корисні для виявлення та зменшення ерозії.*

**Ключові слова:** *гідроенергетична турбіна, кавітаційна ерозія, обчислювальна гідродинаміка.*

**Постановка проблеми**

Виробництво гідроелектроенергії є одним з найважливіших видів відновлюваної енергії, проте водночас воно потребує значних початкових інвестицій, строгого керівництва та обслуговування. Сьогоднішні запаси нестійких водойм потрібно перетворити в стабільну інфраструктуру для майбутніх поколінь. На рис. 1 показано вид з повітря на велику греблю Ітайпу в Бразилії.



Рис. 1. Гребля Ітайпу, Бразилія

На рис. 2 показано порівняння кількості гребель у Китаї та інших країнах світу.

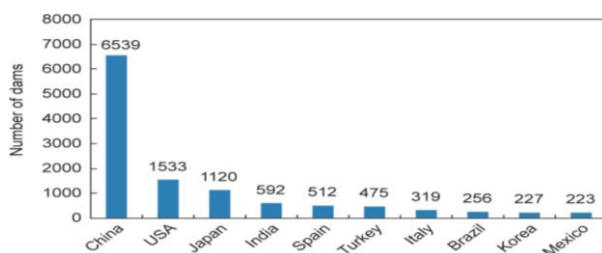


Рис. 2. Кількість гребель висотою понад 30 м у найбільших країнах [1]

Китай, який побудував 6539 гребель висотою понад 30 м, володіє найвищим гідропотенціалом у світі, і на його частку припадає 43 % усіх гребель у світі. При встановленій потужності гідроелектростанцій 300 ГВт [1], що становить 27 % такої потужності гідроенергетики у світі, довжина водопровідних каналів перевищила 13,8 тис. км, а довжина гідротехнічних тунелів перевищує 10 тис. км.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Явище вторинного потоку є глобальною проблемою і спричиняє кавітаційну ерозію в гідравлічному обладнанні [2]. Кавітація – це явище точкової корозії металевої поверхні, що призводить до нестійкості та надзвичайно нерівномірної поведінки потоку, спричиняючи надмірний шум, вібрацію та зниження ефективності в турбінах Френсіса, Каплана та інших [3]. Як турбіни Каплана, так і турбіни Френсіса є турбінами реакційного типу. Турбіни Френсіса (FT) використовуються по всьому світу завдяки своїй відносно компактній конструкції, високій ефективності та роботі під водою на висоті від 100 до 300 м з ефективністю від 90 % до 95 %.

У роботі [4] були представлені динамічні проблеми FT у сучасному розвитку енергетики. Турбіна страждала від різних динамічних нестабільностей під час перехідних і непроектованих режимів роботи. Численні варіації високих частот і низького тиску спостерігалися як в перехідних, так і в сталих умовах. У роботі [5] провели різноманітні дослідження, щоб визначити різні особливості кавітаційних явищ, серед яких пульсація тиску, колапс кавітаційної бульбашки, об'ємна частка пари, кавітаційна вібрація, шум та обертова кавітація. Крім того, обговорювалося, що візуалізація кавітації стане важливою особливістю наукових досліджень під час тестування моделей. Автори дослідження [6] сфокусувалися на розробці чисельної моделі випробувального обладнання для дослідження поведінки потоку витоків і

підтвердили свої результати шляхом експериментів. Як за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD), так і експериментів було виявлено, що потік виток створює прохідний вихор, який відлітає від стінки, рухаючись вниз за течією. У всіх обговорюваних дослідженнях було встановлено, що кавітаційні явища потребують найновішого обладнання для їх виявлення та візуалізації. Крім того, потрібно провести більше роботи для чисельної оцінки кавітації.

Чисельні методи набирають популярність. Пропонується на початковому етапі аналізувати такі компоненти, як робоче колесо і спрямівний апарат, витяжну трубу і т. д., окремо, а потім оцінювати вплив комбінованих компонентів для визначення ерозійного зносу та втрат ефективності.

### Мета статті

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

### Виклад основного матеріалу

Утворення парових бульбашок через падіння статичного тиску нижче тиску пари за місцевою температурою та наступне згортання цих бульбашок через раптове збільшення статичного тиску у рідині називається кавітацією. Явище кавітації призводить до різних проблем, зокрема шуму і вібрації на задніх краях лопаток турбіни та у відсмоктувальних трубах, що в кінцевому підсумку знижує термін служби компонентів і, як наслідок, зменшує ефективність установки. Основними типами кавітації, які можуть виникнути під час роботи ФТ, є передній край, завихрення у відсмоктувальній трубі, рухома бульбашка та вихрова кавітація фон Кармана.

Різні дослідники використовують різні експериментальні методи, як-от конфігурація трибометрів, виміри швидкості за допомогою методів PIV і LDV та інші. Дуже важливо розробити відповідну форму та монтажне положення індукторів кавітації (ІК) для вивчення явища кавітації. За останні два десятиліття метод CFD використовувався для виявлення кавітації шляхом дослідження областей тиску нижче тиску пари за допомогою однофазної моделі. У більшості досліджень вплив кавітаційної бульбашки на поле течії не враховується. Проте вони не можуть надати детальну інформацію, зокрема про вплив кавітації на ефективність, або більш точний прогноз розміру кавітаційної бульбашки. З цієї причини стає необхідним використання методу CFD при двофазному моделюванні. Модель Релея–Плессета є найбільш ефективним інструментом для аналізу завдань двофазного потоку.

У роботі [7] автори вивчали кавітаційну та абразивну ерозію, що розвивається в гідравлічних машинах з високоміцною металевою структурою

матеріалу. Також обговорюється синергія кавітаційної та абразивної ерозії.

Автори статті [8] експериментально дослідили та порівняли вплив кавітаційної ерозії на матеріал альфа-бета-латуні. Як індуктори кавітації використовувалися трикутні тіла, які обтікалися і які використовувалися у шламовому баку трибометра з обертовим диском під різними кутами та довжинами. На рис. 3 зображено зміну втрат маси з різними типами індукторів кавітації та без них.

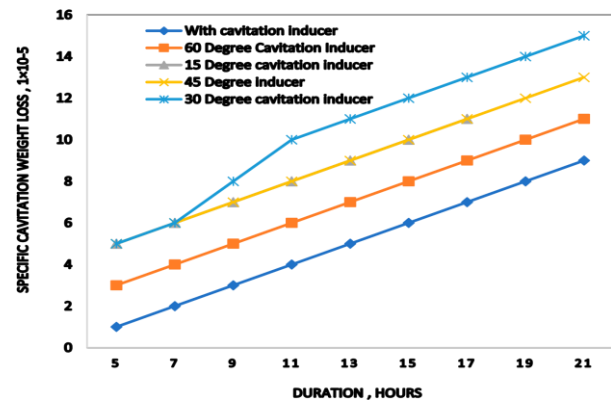


Рис. 3. Сукупна втрата маси залежно від тривалості випробувань без та з індукторами кавітації [8]

Автори наукової праці [9] проаналізували вплив форми піску на кавітаційну ерозію і виявили, що частки неправильної форми мають незначний вплив на кількість пор, але спричиняють зношення твердої поверхні. Крім того, було помічено, що важкі частки спричиняють більш сильну кавітаційну ерозію, ніж частки без важіль.

У роботі [10] автори вивчали кавітаційний пітінг, аналізуючи інкубаційний період. Для проведення пітінгових випробувань в кавітаційному тунелі вони використовували три різні метали: нікель-алюмінієвий бронзовий сплав, алюмінієвий сплав та дуплексну нержавійну сталь. Був вивчений вплив швидкості потоку на декілька параметрів – характерний діаметр та час покриття, і було встановлено стандартний степеневий закон впливу швидкості потоку на швидкість пітінгової корозії для всіх трьох металів.

Автори дослідження [11] представили тестовий приклад з прототипом турбіни номінальною потужністю 444 МВт. Вони використовували поліноміальні двовимірні функції, засновані на поліномах Ерміта, для побудови діаграми горбів, що дозволяє розрахувати вихідну потужність, витрату, ефективність та параметри кавітації. CFD став важливим інструментом для дослідження кавітації, але він потребує перевірки за допомогою ретельно спланованих і проведених експериментів, а також глибокого знання механіки рідини. Багато ресурсів можна заощадити,

використовуючи відповідні спрощені моделі і симетрію. Автори роботи [12] досліджували нестационарний кавітаційний потік в FT при частковому навантаженні, номінальному навантаженні (ВЕР) та умовах перевантаження. Невелика зміна розподілу тиску спостерігалася на поверхні лопаті при умовах часткового навантаження. Було виявлено, що велика різниця тиску спостерігається в умовах перевантаження, як порівняти з умовами номінального навантаження, що показано на рис. 4.

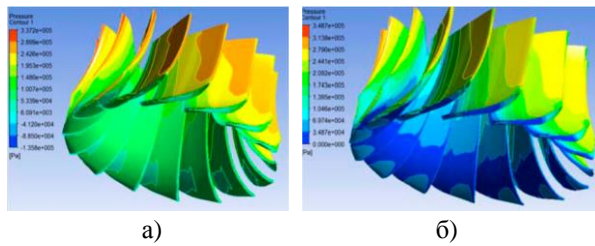


Рис. 4. Зміна тиску на бігунку: а) при номінальному навантаженні; б) при перевантаженні [12]

Встановлено, що утворення бульбашок пари та втрата ефективності турбіни з боку всмоктування робочої лопаті є максимальними в умовах перевантаження. У статті [13] розглянуто роботи, виконані в області досліджень кавітаційної ерозії як у воді, так і в рідкому натрії, оскільки вони є важливими середовищами в ядерних реакторах. Вони сформулювали колапс кавітаційної бульбашки та оцінили тиск колапсу. Обговорювалися також методи вимірювання кавітаційних пошкоджень.

Автори наукової праці [14] досліджували канат парової порожнини та його вісь, яка залежить від рівня налаштування турбіни. Вони провели вимірювання поля швидкості потоку та об'єму компактної нестационарної парової порожнини за допомогою двофазного застосування PIV. Для дослідження об'єму порожнини використовувалися процедури фільтрації та спеціальні методи отримання зображень. Вперше вони розробили веретено в конусі дифузора моделі FT.

У роботі [15] автори поліпшили геометрію всмоктувальної труби для відновлення більш високого статичного тиску. Модифіковані всмоктувальні труби мають більш високу ККД та менший коефіцієнт втрат проти початкового.

Автори роботи [16] проаналізували стан вібрації шляхом моніторингу електричного та механічного обладнання, що використовується на гідроелектростанціях, а також коротке пояснення дефектів, пов'язаних з вібрацією, з урахуванням попередньої літератури за останні 30 років.

У дослідженні [17] автори зосередились на аналізі зароджування кавітації, використовуючи метод вейвлет-часово-частотного розкладу та вейвлет-

пакетного розкладу для обробки сигналів кавітаційного шуму. Результати показали, що характеристики зароджування кавітації можна виявити в слуховому діапазоні частот.

Для гідротурбін робочі точки при частковій витраті є джерелом утворення вихрів на виході з робочого колеса в конусі всмоктувальної труби, як показано на рис. 5 [18]. Кавітація розвинулася в зону низького тиску ядра вихра. Автори роботи порівняли різні методи ідентифікації вихрів для гідротурбін. Вони обговорили і узагальнили багато теоретичних та експериментальних робіт, виконаних зі спостереження вихрів. Геометричні параметри, як-от закрутка внутрішнього потоку, тип турбіни, стан потоку та інші, є параметрами, що впливають на вихри в гідротурбінах. У всмоктувальній трубі було видно FT, вихровий канат, а поруч з бігунком спостерігалися міжлопатні вихри. На вході в робоче колесо виникали стовпчасті вихри, а в міжлопатних каналах поширювалися позовжні вихри.



Рис. 5. Розвиток каната з паровим осердям [18]

Автори статті [19] представили результати для FT, розробленої для невеликої гідроелектростанції шляхом моделювання нестационарного поля потоку, що виникає внаслідок взаємодії ротора і статора при повному протіканні рідини. Часовий аналіз показує контакт між статичними і обертовими областями, а також вплив потоку рідини в різних компонентах. Було обрано чотирнадцять місць, і, змінюючи в часі коливання тиску та рівень вібрації в компонентах, було зафіксовано в спіральному корпусі, робочій лопаті та витяжній трубі. По три місця було обрано на спіральному корпусі та на стороні напору всмоктування робочої лопатки, а п'ять – було обрано у витяжній трубі і позначено, як показано на рис. 6.



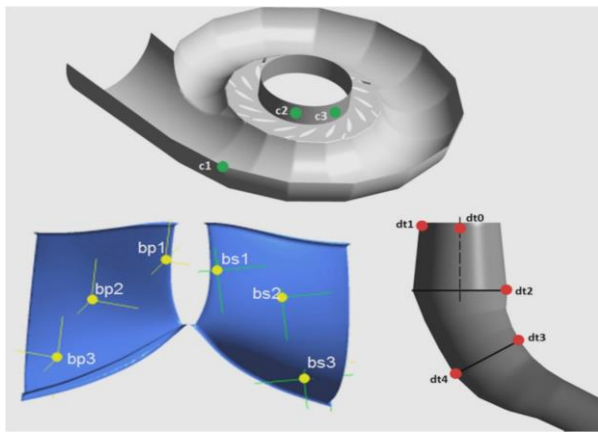


Рис. 6. Місця реєстрації тиску в спіральному корпусі, робочій лопаті та трубі, що відсмоктує [19]

У роботі [20] автори досліджували різні типи кавітації: бічне всмоктування, бічна напірна сторона, передній край, рухома бульбашка, завихрення всмоктувальної труби, вихрова кавітація між лопатками тощо. Щоб запобігти кавітації, робочі лопатки повинні бути спроектовані з урахуванням характеристик потоку. Кавітація спричиняла ерозію, зниження ККД, вібрацію, нестабільність роботи та шум. Моделювання проводилося для 33 робочих точок. Межі кавітації та робочі діапазони були визначені з використанням числових діаграм горбів для спостереження за вже наявними та новими турбінами, як показано на рис. 7.

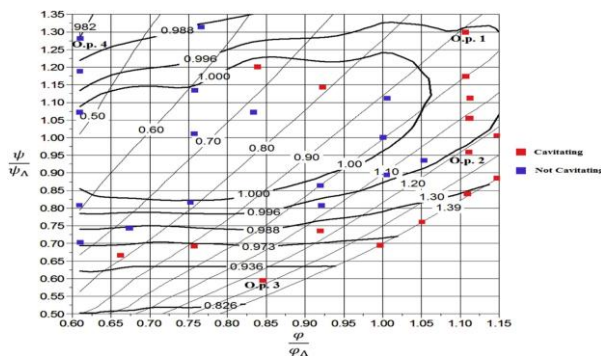


Рис. 7. Діаграма Гілла для відображення робочих точок з кавітацією та без кавітації [19]

Із розглянутого вище можна зробити висновок, що кавітація являє собою складне явище. Багато параметрів і особливостей ще потребують подальшого вивчення та дослідження. Індуктори кавітації та деякі методи візуалізації, як-от PIV, LDV та ін., використовуються багатьма дослідниками як експериментальні засоби для вивчення явища кавітаційної ерозії. В останнє десятиліття CFD широко використовувався і було отримано розумні результати. Автори роботи [21] критично розглянули методи перевірки і валідації, застосовувані при вивченні гідравлічних турбін, і запропонували майбутні напрями дослі-

джен для роботи з моделюванням CFD. Майбутні дослідження CFD повинні бути спрямовані на динамічну сітку і змінну швидкість. Вони також зазначили, що проблеми загостяться, коли буде потрібне спільне дослідження перехідних процесів CFD і FSI (взаємодія рідини та конструкції). Наголошується на необхідності розробки добре зарекомендованого посібника з проведення досліджень CFD для гідравлічних турбін, включно з належною перевіркою і валідацією для FSI [22].

## Висновки

У межах цієї статті проаналізовано дослідницькі роботи, які було проведено за останнє десятиліття різними вченими в галузі кавітаційної ерозії. Критичному аналізу підлягали як експериментальні, так і числові дослідження кавітаційної ерозії. У деяких дослідженнях обговорюється сукупний ефект як кавітаційних, так і седиментаційних явищ. Нижче подані висновки, зроблені в цій статті:

- індуктори кавітації та деякі новітні методи візуалізації, як-от PIV, LDV та ін., використовуються деякими дослідниками як експериментальні засоби для вивчення явищ кавітації. В останнє десятиліття числова методологія широко використовувалася під час проведення досліджень та експериментів, і були досягнуті помітні результати;

- вивчення кавітаційної ерозії в турбінах гідроелектростанцій є складною задачею для майбутніх досліджень. Тому рекомендується розробити відповідну методологію CFD, перевірену за допомогою експериментальних методів кількісної оцінки комбінованого ефекту.

## Література

1. Jia J. A Technical Review of Hydro-Project Development in China // *Engineering* 2016, vol. 2, P. 302–312. <http://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.008>
2. Кнэпп, Р. Кавітація / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. М.: Мир, 1974. 688 с.
3. Срібнюк, С.М. Зв'язок вакууму з виникненням явища кавітації / С.М. Срібнюк, Л.Л. Зубричева, // *Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. / Акад. буд-цтва України. – Х.: ХДТУБА, 2010 – вип. 59. – С. 293 – 297.*
4. Goyal R., Gandhi B.K. Review of hydrodynamics instabilities in Francis turbine during off-design and transient operations // *Renew: Energy* 2018, vol. 116, P. 697–709. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.012>
5. Tomaz R. An Investigation of the Relationship between Acoustic Emission, Vibration, Noise and Cavitation Structures on a Kaplan Turbine // *J. Fluids Eng.* 2007, vol. 129, P. 1112–1122.
6. Chitrakar S., Singh B., Gunnar O., Prasad H. Numerical and experimental study of the leakage flow in guide vanes with different hydrofoils // *J. Comput. Des. Eng.* 2017, vol. 4, P. 218–230. <http://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.02.004>
7. Ghiban B., Safta C.-A., Ion M., Crângas, C.E., Grecu M.-C. Structural Aspects of Silt Erosion Resistant Materials Used in Hydraulic Machines Manufacturing // *Energy Procedia* 2017, vol. 112, P. 75–82. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1064>

8. Amarendra H.J., Chaudhari G.P., Nath S.K. Synergy of cavitation and slurry erosion in the slurry pot tester // *Wear* 2012, vol. 290–291, P. 25–31.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.025>
9. Haosheng C., Jiadao W., Darong C. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular microparticles // *Wear* 2008, vol. 126, P. 1–4.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.010>
10. Franc J.-P., Riondet M., Karimi A., Chahine G.L. Material and velocity effects on cavitation erosion pitting // *Wear* 2012, vol. 274–275, P. 248–259.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.006>
11. Pereira J.G., Andolfatto L., Avellan F. Monitoring a Francis turbine operating conditions // *Flow Meas: Instrum.* 2018, vol. 63, P. 37–46.  
<http://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.07.007>
12. Gohil P., Saini R. Indian Institute of Technology Roorkee Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant // *J. Appl: Fluid Mech.* 2016, vol. 9, P. 357–365.
13. Sreedhar B., Albert S., Pandit A. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear* 2017, vol. 372–373, P. 177–196. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>
14. Iliescu M.S., Ciocan G.D., Avellan F. Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow // *J. Fluids Eng.* 2008, vol. 130, P. 1–10.  
<http://doi.org/10.1115/1.2813052>
15. Arispe T.M., Oliveira W., Ramirez R.G. Francis turbine draft tube parameterization and analysis of performance characteristics using CFD techniques // *Renew: Energy* 2018, vol. 127, P. 114–124.  
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.055>
16. Mohanta R.K., Chelliah T.R., Allamsetty S., Akula A., Ghosh R. Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A Review // *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2017, vol. 20, P. 637–648.  
<http://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.11.004>
17. Kang Z., Feng C., Liu Z., Cang Y., Gao S. Analysis of the incipient cavitation noise signal characteristics of hydro-turbine // *Appl. Acoust.* 2017, vol. 127, P. 118–125.  
<http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.029>
18. Zhang Y., Liu K., Xian H., Du X. A review of methods for vortex identification in hydroturbines // *Renew: Sustain. Energy Rev.* 2018, vol. 81, P. 1269–1285.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.058>
19. Kc A., Thapa B., Lee Y. Transient numerical analysis of rotor e stator interaction in a Francis turbine // *Renew: Energy* 2014, vol. 65, P. 227–235.  
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.013>
20. Celebioglu K., Altintas B., Aradag S., Tascioglu Y. Numerical research of cavitation on Francis turbine runners // *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, vol. 43, P. 1–11.  
<http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.180>
21. Trivedi C., Dahlhaug O. A Comprehensive Review of Verification and Validation Techniques Applied to Hydraulic Turbines // *Int. J. Fluid Mach. Syst.* 2019, vol. 12, P. 345–367.  
<http://doi.org/10.5293/IJFMS.2019.12.4.345>
22. Noon A.A., Kim M.-H. Sediment and Cavitation Erosion in Francis Turbines – Review of Latest Experimental and Numerical Techniques // *Energies* 2021, vol. 14, P. 1516.  
<https://doi.org/10.3390/en14061516>
1. Jia J. A Technical Review of Hydro-Project Development in China // *Engineering* 2016, vol. 2, P. 302–312.  
<http://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.008>
2. Knapp, R. Cavitation / R. Knapey, J. Daly, F. Hammit. M.: Mir, 1974. 688 p.
3. Sribnyuk, S.M. The connection between vacuum and the phenomena of cavitation / S.M. Sribnyuk, L.L. Zubricheva, // Scientific journal of everyday life: zb. Sci. etc. / Academician future of Ukraine. – Kh.: HDTUBA, 2010 – vol. 59. – P. 293 – 297.
4. Goyal R., Gandhi B.K. Review of hydrodynamics instabilities in Francis turbine during off-design and transient operations // *Renew: Energy* 2018, vol. 116, P. 697–709.  
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.012>
5. Tomaz R. An Investigation of the Relationship between Acoustic Emission, Vibration, Noise and Cavitation Structures on a Kaplan Turbine // *J. Fluids Eng.* 2007, vol. 129, P. 1112–1122.
6. Chitrakar S., Singh B., Gunnar O., Prasad H. Numerical and experimental study of the leakage flow in guide vanes with different hydrofoils // *J. Comput. Des. Eng.* 2017, vol. 4, P. 218–230. <http://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.02.004>
7. Ghiban B., Safta C.-A., Ion M., Crângas C.E., Grecu M.-C. Structural Aspects of Silt Erosion Resistant Materials Used in Hydraulic Machines Manufacturing // *Energy Procedia* 2017, vol. 112, P. 75–82.  
<http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1064>
8. Amarendra H.J., Chaudhari G.P., Nath S.K. Synergy of cavitation and slurry erosion in the slurry pot tester // *Wear* 2012, vol. 290–291, P. 25–31.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.025>
9. Haosheng C., Jiadao W., Darong C. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular microparticles // *Wear* 2008, vol. 126, P. 1–4.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.010>
10. Franc J.-P., Riondet M., Karimi A., Chahine G.L. Material and velocity effects on cavitation erosion pitting // *Wear* 2012, vol. 274–275, P. 248–259.  
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.006>
11. Pereira J.G., Andolfatto L., Avellan F. Monitoring a Francis turbine operating conditions // *Flow Meas: Instrum.* 2018, vol. 63, P. 37–46.  
<http://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.07.007>
12. Gohil P., Saini R. Indian Institute of Technology Roorkee Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant // *J. Appl: Fluid Mech.* 2016, vol. 9, P. 357–365.
13. Sreedhar B., Albert S., Pandit A. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear* 2017, vol. 372–373, P. 177–196. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>
14. Iliescu M.S., Ciocan G.D., Avellan F. Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow // *J. Fluids Eng.* 2008, vol. 130, P. 1–10.  
<http://doi.org/10.1115/1.2813052>
15. Arispe T.M., Oliveira W., Ramirez R.G. Francis turbine draft tube parameterization and analysis of performance characteristics using CFD techniques // *Renew: Energy* 2018, vol. 127, P. 114–124.  
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.055>
16. Mohanta R.K., Chelliah T.R., Allamsetty S., Akula A., Ghosh R. Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A Review // *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2017, vol. 20, P. 637–648.  
<http://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.11.004>
17. Kang Z., Feng C., Liu Z., Cang Y., Gao S. Analysis of the incipient cavitation noise signal characteristics of hydro-turbine // *Appl. Acoust.* 2017, vol. 127, P. 118–125.  
<http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.05.029>
18. Zhang Y., Liu K., Xian H., Du X. A review of methods for vortex identification in hydroturbines // *Renew: Sustain. Energy Rev.* 2018, vol. 81, P. 1269–1285.  
<http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.058>

## References

1. Jia J. A Technical Review of Hydro-Project Development in China // *Engineering* 2016, vol. 2, P. 302–312.  
<http://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.008>
2. Knapp, R. Cavitation / R. Knapey, J. Daly, F. Hammit. M.:

19. Кс А., Шапа В., Lee Y. Transient numerical analysis of rotor e stator interaction in a Francis turbine // *Renew: Energy* 2014, vol. 65, P. 227–235.

<http://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.013>

20. Celebioglu K., Altintas B., Aradag S., Tascioglu Y. Numerical research of cavitation on Francis turbine runners // *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, vol. 43, P. 1–11.

<http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.180>

21. Trivedi C., Dahlhaug O. A Comprehensive Review of Verification and Validation Techniques Applied to Hydraulic Turbines // *Int. J. Fluid Mach. Syst.* 2019, vol. 12, P. 345–367.

<http://doi.org/10.5293/IJFMS.2019.12.4.345>

22. Noon A.A., Kim M.-H. Sediment and Cavitation Erosion in Francis Turbines – Review of Latest Experimental and Numerical Techniques // *Energies* 2021, vol. 14, P. 1516.

<https://doi.org/10.3390/en14061516>

**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](mailto:Oleg.Palchenko@kname.edu.ua)

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

## CAVITATION EROSION IN FRANCIS TURBINES

O. Palchenko

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

*The phenomenon of secondary flow is a global problem that causes cavitation erosion in hydraulic equipment. Cavitation is a phenomenon of localised corrosion of the metal surface leading to instability and highly uneven flow behaviour with a consequent excessive noise, vibration, and decreased efficiency in Francis, Kaplan, and other turbines. Both Kaplan and Francis turbines are reaction turbines. Francis turbines (FT) are used worldwide due to their relatively compact design, high efficiency, and operation underwater at heights ranging from 100 to 300 m with an efficiency ranging from 90% to 95%.*

*The article analyses the latest relevant research conducted by various researchers on different turbine components. The analysis shows that this type of erosion depends on flow characteristics, surface, and properties of the material eroding. Tools for design optimisation, cavitation erosion, and well-conducted experiments will provide results for identifying and reducing erosion. Although some researchers conducted experimental work to study the effect of cavitation erosion, literature on computational fluid dynamics (CFD) is very scarce. Over the past two decades, experts have been applying CFD methods to detect cavitation by examining areas where the pressure is below the vapour pressure with a single-phase model. Most studies do not consider the impact of cavitation bubbles on the flow field. However, these methods cannot provide detailed information, such as the impact of cavitation on efficiency or a more accurate prediction of the cavitation bubble size.*

*Some researchers use cavitation inducers and some of the latest visualisation methods as experimental tools to study cavitation phenomena. In the last decade, a numerical methodology has been widely used in research and experiments, yielding significant results.*

*Studying cavitation erosion in hydroelectric turbine systems presents a complex challenge for future research. Many parameters and features still require further investigation. All the discussed studies have established that cavitation phenomena require state-of-the-art equipment for their detection and visualisation. Moreover, more work is necessary for the numerical assessment of cavitation.*

**Keywords:** hydroelectric turbine, cavitation erosion, computational fluid dynamics.