

**Пальченко О.Л.**

*Харківський національний університет будівництва та архітектури  
(ул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: [oleg\\_palchenko@yahoo.com](mailto:oleg_palchenko@yahoo.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-3809-3148>)*

## **АНАЛІЗ ДОСВІДУ КОМПЕНСАЦІЇ ВИСНАЖЕННЯ РОЗЧИНЕНОГО У ВОДІ КИСНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ТУРБІННОЇ АЕРАЦІЇ ВОДИ**

Розглянуто існуючий світовий та вітчизняний досвід оновлення та переоснащення існуючих гідроелектростанцій, який пов'язаний з технологією аерації на гідроагрегатах ГЕС. Розглянуто технологію, що дозволяє модифікованому агрегатному блоку підтримувати необхідний рівень розчиненого в воді кисню в разі його зниження, що сприяє покращенню якості води та екологічного стану річкової екосистеми, в тому числі відповідно до умов експлуатації та сезонних потреб.

**Ключові слова:** аерація води, агрегатний блок, відновлення якості річкової води, водні екосистеми

Вступ. Існуючий досвід роботи на ринку гідравлічних систем стикається з сильним тиском як з боку держави, як головного регулятора, так і громадського характеру, який спрямований на прагнення пом'якшити екологічні проблеми, що пов'язані із використанням гідравлічних турбін для виробництва електроенергії, включаючи зниження смертності риб і планктону. Для вирішення цих складних завдань проводиться модернізація існуючих, встановлених і працюючих агрегатів, а також проектується нові агрегати, які здатні компенсувати виснаження розчиненого у воді кисню за допомогою турбінної аерації.

Нові тенденції на енергетичному ринку також включають збільшену заклопотаність, яка пов'язана з оптимізацією використання існуючих гідроенергетичних активів.

В даний час існує тенденція формувати консорціуми, які працюють над спільними проектами, які передбачають тісне партнерство між комунальними службами, виробниками електроенергії та екологами.

Матеріали дослідження. У гідроенергетиці часто проводяться аналізи науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) для нових прототипів, з метою поліпшити їх технічні характеристики і характеристики кавітації [1].

Виникає маса питань, пов'язаних з встановленням реального впливу модернізації гідроелектростанції на її

ефективність і продуктивність або розумінням впливу модернізації існуючого обладнання на ефективність аерації, спрямованої на зниження смертності риб і планктону.

Як наявні проблеми, так і проблеми, які виникають в даний час, з'являються в зв'язку із оптимізацією виробництва енергії з урахуванням екологічних проблем.

Дані проблеми дуже складні і їх вирішення лише виграє від спільного досвіду людей з різних сфер та організацій, включаючи енергетичні компанії, виробників обладнання, територіальні громади, представників аграрного і харчового секторів економіки, університети та урядові установи. В даному випадку, як ніколи, потрібні фахівці, які використовують різні підходи для досягнення своїх цілей, такі як чисельне моделювання інженерних та екологічних проблем, в поєднанні із модельними випробуваннями та експериментами. Модельні випробування – це єдиний спосіб на сьогоднішній день оцінити нові екологічні стратегії, такі як аерація.

Оновлення та переоснащення застарілих в технічному відношенні гідроелектростанцій в найближчому майбутньому складуть переважну більшість гідроенергетичних проектів в усьому світі.

Проводячи модернізацію обладнання ГЕС, генеруючі компанії, з одного боку, мають на мету підвищити виробництво електроенергії за рахунок підвищення ефективності обладнання, тим самим, за рахунок максимізації прибутку,

забезпечити захист своїх активів на довгостроковій основі. З іншого боку, модернізація повинна привести до мінімізації супутніх витрат, які пов'язані з екологічними проблемами і новими нормативними актами.

Окрім наявності великомасштабних екологічних проблем, що пов'язані з утворенням водосховища вище за течією від греблі, при модернізації ГЕС можуть бути вирішені три дуже важливі екологічні проблеми. А саме – зменшення вмісту кисню нижче за течією від створу ГЕС, збільшення виживаності планктону, що проходить через турбінні водоскиди, і, нарешті, гарантія мінімальних витрат для підтримки середовища проживання риб.

Щоб хоча б частково відповідати новим вимогам, потрібні модельні випробування для поліпшення аерації турбіни і розробки найкращих пристроїв для максимального перенесення кисню, при цьому зберігаючи високу ефективність турбіни. Одним з методів аерації, і, можливо, найбільш економічним, є автоматична вентиляція через турбіну [2].

Добре відомо, що подача повітря є ефективним методом ослаблення коливань тиску, особливо в турбінах типу Френсіса. Також встановлено, що подача повітря в зони низького тиску турбіни Френсіса часто є оптимальним методом для збільшення кількості розчиненого кисню (DO) у воді, що проходить через турбіну [3-6].

Проведені дослідження показують [4], що в залежності від умов експлуатації на конкретній ділянці, варіанти, що розглядаються для досягнення цільового поглинання DO, повинні вибиратися адекватно, щоб оптимізувати гідравлічні характеристики, а також екологічні характеристики.

Подача повітря через турбіну в окремих випадках може викликати втрату ефективності при номінальному і повному навантаженні, збільшуючись з кількістю повітря і напору. Але ці втрати можна мінімізувати, поліпшивши пристрій для вприскування повітря [5]. Аерація також може бути оптимізована відповідно до сезонних потреб і рівнем продуктивності турбіни.

Процес дифузії повітря через воду також може бути поліпшений.

Низькі рівні DO можуть виникати в резервуарі поруч зі входом турбіни за рядом причин, описаних Ruane і Hauser [7]. В умовах зміни клімату, коли відбувається підвищення температури води, вода, що надходить в річку з низьким вмістом DO, може негативно впливати на водне середовище проживання вниз за течією і може привести до багатьох інших проблем [8-13].

Світовий досвід. Більш ніж 50 років аерація води є загально визнаним підходом для поліпшення якості води в річках. За цей час було придбано досить великий як технічний, так і екологічний досвід в даному питанні.

Залежно від конкретних умов і конкретних потреб використовують або окремі аератори, встановлені за греблею ГЕС, або здійснюють аерацію води безпосередньо на вході в агрегат.

У США на законодавчому рівні закріплені вимоги щодо мінімального рівня DO в воді за греблею ГЕС. І ГЕС зобов'язані підтримувати рівень DO в разі його зниження.

Прикладом використання окремого аератора за греблею ГЕС може служити South Holston Dam (42 МВт, Tennessee, США), ГЕС Lloyd Shoals (18 МВт, Georgia, США) та ін.

ГЕС Lloyd Shoals може служити ще і прикладом того, як вдало восени 2004 року була проведена модернізація обладнання і персонал станції додав систему аерації до одного агрегатного блоку за методом, розробленим Alabama Power Company в кінці 1970-х років для аерації наскрізної труби на кількох її ГЕС. Система почала працювати влітку 2005 року з відмінними результатами. Було показано, що модифікований блок піднімає рівні DO від майже нуля до майже насичення. Восени 2006 року персонал оснастив другий і третій агрегатні блоки аналогічною системою аерації. Це зробило три агрегатних блоки доступними для аерації влітку 2007 року.

Установка draft tube aeration в Lloyd Shoals виявилася економічним і

ефективним засобом відповідності стандартам DO. Загальна вартість установки системи склала трохи більше ніж 200 000 доларів за всі три агрегати. Водозлив був розібраний, а щорічні витрати на ремонт водозливу і втрати енергії (від 1 до 5 відсотків) від водозливу були виключені.

Єдина вартість експлуатації – це невелике зниження (приблизно на 2-3 відсотки, виміряне на інших установках з даною аераційною системою) ефективності агрегатів, що оснащені аераторами, яке відбувається тільки при включеній аераційній системі. Дана знижена ефективність більш ніж компенсується збільшенням напору, що є результатом видалення водозливу [14].

Станом на 2015 рік загальна кількість агрегатів, оснащених аераторами, тільки в США склало 178 на 58 ГЕС [15,16].

У Великобританії пішли іншим шляхом. У пошуках вирішення проблеми скидів неочищених стічних вод і міських стоків центрального Лондона були проведені дослідження і в якості альтернативного рішення було запропоновано введення кисню в річку в потрібний час і в потрібному місці.

У 1989 році в експлуатацію вступило спеціально побудоване судно Thames Bubbler. Судно вприскує до 30 тонн кисню за добу безпосередньо в річку в потрібний час і в потрібному місці.

У 1997 році було запущено в експлуатацію нове судно для оксигенації Thames Vitality з тієї ж місткістю, що і Thames Bubbler.

Обидва цих судна належать компанії Thames Water Utilities і управляються нею в рамках операційної угоди із Агентством з охорони навколишнього середовища і можуть бути розгорнуті протягом декількох годин в будь-якому місці русла річки, де є ймовірність того, що рівень кисню впаде до критичного рівня. Судна були розгорнуті 24 дні у 2000 році, 30 днів у 2001 році, 48 днів у 2002 році, 25 днів в 2003 році і 29 днів в 2004 році. На додаток до цих двох суден були побудовані дві установки, одна на очисних спорудах в Барнс, а інша на насосній станції Rimlico, де зберігається перекис водню, яка надходить в

річку в якості додаткового джерела оксигенації в міру необхідності. Поки остаточне рішення цієї проблеми не буде погоджено, поточні процедури щодо пом'якшення наслідків триватимуть [18].

За результатами даного позитивного досвіду, для поліпшення стану вод річки Suzhou (53 км, протікає через мегаполіс Шанхай) був побудований Suzhou Creek Bubbler (2001) [15,16].

Україна. Головною водною артерією країни є річка Дніпро. Загальна протяжність Дніпра в рамках держави складає трохи менше ніж 1000 км. Більша частина русла Дніпра зарегульована каскадом водосховищ.

При створенні каскаду водосховищ було затоплено величезна площа заплавних високородючих земель, майже третина з яких – це сільськогосподарські угіддя. Інструкції при підготовці ложа майбутнього водосховища передбачають зняття верхнього родючого шару ґрунту і переміщення його в інше місце. Але, на жаль, ця робота не скрізь була виконана і добра частина заплавних чорноземів була затоплена. Також місцями потрапив в зону затоплення і заплавний ліс. Таким чином, фітопланктон отримав високопоживну середу, що сприяло тривалому і бурхливому «цвітінню» води у новостворених водосховищах.

Зараз головним фактором «цвітіння» українських водойм є підвищення концентрації фосфатів в акваторіях. Фосфати активно використовуються в різних засобах побутової та промислової хімії. У русло річки вони потрапляють разом із стічними водами [19].

Проблема в тому, що міські очисні споруди здатні переробляти лише органіку, але вони безсилі перед важкими металами, хімічними сполуками і нафтопродуктами, які практично транзитом через очисні споруди потрапляють прямо в річку.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що до вказаних чинників «цвітіння» води додалися нові. Через аномалії клімату останні роки є маловодними. Об'єм талої води суттєво зменшився, наповнюваність водосховищ опустилася до небезпечної

позначки, а концентрація фосфатів продовжує збільшуватися. Глобальна зміна клімату проявила себе не тільки в зменшенні водності українських річок, а й у підвищенні середньостатистичних позначок температур, що, у свою чергу, є одним з основних факторів, які запускають процес раннього «цвітіння» води [19].

Продовжує відбуватися масова забудова берегів водойм, що істотно порушує водообмін між водосховищами і підземними водами.

Відбуваються застійні явища у водосховищах, особливо це стосується мілководних зон, яких, внаслідок маловоддя річок в останні роки, стає все більше.

У періоди інтенсивного «цвітіння» води сонячні промені не мають можливості проникнути в товщу води на глибину більше ніж два метри. В результаті чого запускається процес відмирання фітопланктону, який осідає на дно. На дні відмерлий фітопланктон починають переробляти бактерії, витрачаючи на даний процес всі залишки кисню. У водоймах утворюються так звані «мертві зони», майже непридатні для життя. Наші водосховища мають чіткий поділ: сприятлива зона – це приблизно два метри від поверхні, далі перехідна зона на глибині до 5 метрів, глибше 6-7 метрів – зона з аномально низьким вмістом кисню [19].

В Україні тільки ПрАТ «Укргідроенерго», повний пакет акцій якого належать державі, має у своєму розпорядженні гідротехнічні споруди і відповідне обладнання, що дозволяють проводити аерацію води на глибинах, більших за сім метрів, тобто там, де проходить основний потік річкової води з найменшим вмістом кисню [15].

Подача повітря в воду, яка проходить через ГЕС, може здійснюватися кількома способами. Повітря може подаватися на вхід гідротурбіни, прямо в гідротурбіну, а також у воду, яка вже пройшла гідротурбіну. У кожного з зазначених способів є свої недоліки і переваги.

Абсолютно логічно, що об'єктом апробації та впровадження стала одна з ГЕС Дніпровського каскаду, а саме – Каховська. Дніпро – це основна водна артерія

України, це близько 80% водних ресурсів країни й близько 7% електроенергії, що виробляється в країні.

На агрегаті №6 Каховської ГЕС у серпні 2019 року було експериментально перевірено метод аерації. Було обрано спосіб подачі повітря перед гідротурбіною.

В ході експерименту відбиралися проби води: до початку експерименту, під час проведення експерименту, а також після закінчення експерименту. Всього було відібрано близько 50 проб, аналіз яких був проведений в Херсонській лабораторії моніторингу вод та ґрунтів Державного агентства водних ресурсів України.

Також були проведені виміри DO на різних відмітках глибини і на різних відстанях від греблі.

Дослідження показали, що аерація Дніпровської води можлива і дає позитивний результат. Ефективність аерації залежить від багатьох чинників, но отриманий позитивний досвід збільшення DO нижче створу ГЕС дозволяє розглядати аерацію на гідроагрегатах ГЕС як досить ефективний засіб для покращення якості річкової води, що є надійною підставою для подальшого впровадження даної технології на гідроагрегатах ГЕС України [15-17].

Поетапна реконструкція ГЕС Дніпровського каскаду дасть можливість здійснювати безперервну аерацію на всіх гідротурбінах і дозволить зробити істотний ривок у вирішенні існуючих проблем. Такіх, як поліпшення якості води в річці Дніпро, адаптація системи моніторингу стану водних екосистем до європейських норм, впровадження режимів роботи ГЕС з урахуванням вартості екосистемних послуг.

**Висновки.** Для вирішення технічних і екологічних проблем, які стоять перед суспільством, ясно, що потрібно розробляти нові моделі співпраці і фінансування між енергетичними компаніями, комунальними службами, територіальними громадами, виробниками обладнання, представниками аграрного і харчового секторів економіки, університетами та урядом. Необхідно створювати нові та оригінальні способи партнерства, ділитися фінансуванням і більш тісно і відкрито співпрацювати разом.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Deschênes C, Fraser R and Fau JP 2002 *International group of hydraulic efficiency measurement (IGHM) (Toronto, Canada) New trends in turbine modelling and new ways of partnership 1-12* [Google Scholar]
2. March, P. Hydraulic and environmental performance of aerating turbine technologies. In EPRI-DOE Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines: Technical Papers; EPRI: Palo Alto, CA, USA; U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA, 2011; pp. 19–21. [Google Scholar]
3. Gaffney, S. R., Jablonski, T. A., Kirejczyk, J., Using Hydro Turbines to Enhance Dissolved Oxygen Levels, *Hydro Review*, August 1999.
4. Papillon, B.; Sabourin, M.; Couston, M.; Deschenes, C. Methods for air admission in hydro turbines. In Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, Switzerland, 9–12 September 2002; pp. 1–6. [Google Scholar]
5. Ruane, R.J., Hauser, G.E., Factors Affecting Dissolved Oxygen in Hydropower Reservoir, *Waterpower* 1991, Proceedings of the International Conference on Hydropower, ASCE, Denver, Colorado, July 1991.
6. Hopping, P., March, P., Brice, T., Update on Development of Auto-Venting Turbine Technology, *Waterpower* 1997, Proceedings of the International Conference on Hydropower, ASCE, Atlanta, Georgia, August 1997.
7. Ruane, R.J., Hauser, G.E., Factors Affecting Dissolved Oxygen in Hydropower Reservoir, *Waterpower* 1991, Proceedings of the International Conference on Hydropower, ASCE, Denver, Colorado, July 1991.
8. Методика розрахунку антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану басейнів малих річок України / УНДІВЕП, Видання 2-ге, перероблене і доповнене. – К.:“Полімед”.– 2007. – 71 с.
9. Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (пояснення, застереження, приклади) /А.В. Яцик, В.М. Жукинський, А.П. Чернявська, – К.: Оріяни, 2006. – 44 с.
10. Методика розрахунку антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану басейнів малих річок України / УНДІВЕП, Видання 2-ге, перероблене і доповнене. – К.:“Полімед”.– 2007. – 71 с.
11. Пальченко О.Л. Екосистемний підхід у водному господарстві (ЕСПУВГ) і екологічна безпека водосховищ ГЕС. Науковий вісник будівництва. Вип. №66. ХДТУБА 2011, с. 309.
12. Пальченко О.Л. Інтегральна оцінка впливу антропогенного евтрофування та забруднень на екологічний стан водних екосистем. Науковий вісник будівництва. Вип. №2.– Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015, с. 179-183. [Google Scholar]
13. Cooke G.D. Restoration and management of lakes and reservoirs. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 591 p.
14. Increasing Dissolved Oxygen with a Draft Tube Aeration System [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.renewableenergyworld.com/2009/03/01/increasing-dissolved-oxygen-with-a-draft-tube-aeration-system/#gref> – 10.03.2020. – Загол. з екрану.
15. Впровадження технології аерації води в гідроагрегатах ГЕС [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://uhe.gov.ua/stalyu\\_rozvytok/korporativna-sotsialna-vidpovidalnist/okhrona\\_dovkillya/proekty/vprovadzhennya](https://uhe.gov.ua/stalyu_rozvytok/korporativna-sotsialna-vidpovidalnist/okhrona_dovkillya/proekty/vprovadzhennya) – 11.03.2020. – Загол. з екрану.
16. Промислові випробування можливості впровадження аерації води на ГЕС Дніпровського каскаду [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/35815.pdf> – 11.03.2020. – Загол. з екрану.
17. Результати першого в Україні досвіду аерації води на гідроагрегатах ГЕС. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2019-12/10.pdf> – 11.03.2020. – Загол. з екрану.
18. The river Themes – its pollution and clean up [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.the-river-thames.co.uk/environ.htm> – 13.03.2020. – Загол. з екрану.
19. Зелений Дніпро [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://texty.org.ua/d/static/wrack/> – 13.03.2020. – Загол. з екрану.

Пальченко О.Л. АНАЛІЗ ОПИТА

## КОМПЕНСАЦИИ ИСТОЩЕНИЯ РАСТВОРЕННОГО В ВОДЕ КИСЛОРОДА С ПОМОЩЬЮ ТУРБИННОЙ АЭРАЦИИ ВОДЫ.

Рассмотрен существующий мировой и отечественный опыт обновления и переоснащения гидроэлектростанций, связанный с технологией аэрации на гидроагрегатах ГЭС. Рассмотрена технология, позволяющая модифицированному агрегатному блоку поддерживать необходимый уровень растворенного в воде кислорода в случае его снижения, что способствует улучшению качества воды и экологического состояния речной экосистемы, в том числе в соответствии с условиями эксплуатации и сезонными нуждами.

**Ключевые слова:** аэрация воды, агрегатный блок, улучшение качества речной воды, водные экосистемы.

## Palchenko O.L. ANALYSIS OF THE COMPENSATION EXPERIENCE OF THE DEPLETION OF OXYGEN DISSOLVED IN WATER USING TURBINE AERATION OF WATER.

The article deals with the examination of the existing world and domestic experience of the renewal and reequipment of hydroelectric power plants related to the aeration technology at hydro-power units. The technology, which allows a modified aggregate unit to maintain the required level of oxygen dissolved in water as applied to its decrease, was studied. It helps to improve the water quality and the ecological state of the river ecosystem including the accordance with the operating conditions and seasonal needs.

**Key words:** water aeration, aggregate unit, improvement of the river water quality, water ecosystems.

DOI: 10.29295/2311-7257-2020-99-1-154-159  
УДК 624.155.152

**Пантелесенко В.І., Червоноштан А.Л., Хомчик М.С.**

*Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (вул. Чернишевського, 24-а, 49005, м. Дніпро, Україна, e-mail: vladmaestro2017@gmail.com, Andrew.chervonoshtan@pgasa.dp.ua, robot-mr@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-5651-8616 ORCID ID: 0000-0003-3458-0034)*

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОНІЧНИХ БЕТОННИХ БЛОКІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ УЩІЛЬНЕНОЇ ЗОНИ ПРИ ЇХ ЗАНУРЕННІ У ГРУНТ

У практиці будівництва пустотілі конічні цільноформовані бетонні блоки застосовуються при зведенні каркасних будівель невеликої етажності. При зануренні таких блоків під ними і навколо них утворюється ущільнена зона за рахунок чого істотно підвищується їх несуча здатність. Застосування конічних блоків дозволяє скоротити об'єм земляних робіт, понизити витрату бетону і кошторисну вартість робіт нульового циклу. Мета наукового дослідження полягає в вивченні напруженого стану конічних бетонних блоків під дією статичного навантаження, а також дослідження формування ущільненої зони при їх зануренні у ґрунт. Дослідження процесу занурення конічних блоків у ґрунт проводилися в безпосередній близькості від зведених будинків і споруд на будівельних майданчиках. Для з'ясування якісних закономірностей і фізичної сутності процесу занурення конічних блоків використовувався спеціально розроблений стенд. В роботі представлені епюри напруженого стану двох типів конічних бетонних блоків під дією статичного навантаження. Епюри побудовані з використанням комп'ютерної програми «SolidWorks». Вихідними даними в цьому випадку були такі параметри: геометричні параметри блоку, товщина стінки, матеріал блоку та статичне навантаження. Дослідження процесу занурення в польових умовах за допомогою спеціального стенду підтверджують припущення про те, що в процесі занурення бетонних конічних блоків навколо них і в основі формується ущільнена зона з підвищеними характеристиками міцності. При зануренні конічних блоків площа яких близька до