



## РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРШОГО В УКРАЇНІ ДОСВІДУ АЕРАЦІЇ ВОДИ НА ГІДРОАГРЕГАТАХ ГЕС

*Розглянуто світовий позитивний досвід запровадження технології аерації на гідроагрегатах ГЕС, як інструменту покращення якості води і екологічного стану річкових екосистем. Івчено технічну можливість аерації води, що проходить крізь гідроагрегати Каховської ГЕС та відмічено досить високу ефективність цього процесу.*

*К л ю ч о в і с л о в а: аерація, кисень, гідроагрегат, Каховська ГЕС*

Одним з найважливіших розчинених у воді газів є кисень. Динаміка його вмісту визначається фізико-хімічними і біологічними процесами. Від концентрації кисню залежить швидкість та спрямованість окисно-відновлювальних процесів у воді, формування якості вод та їх екологічного стану. В аеробних умовах переважає окислення речовин, що сприяє самоочищенню водного середовища і посилення стійкості до забруднення. При цьому біогенні речовини, важкі метали, органічні забруднюючі сполуки в складі суспензій (мінерали, детрит, органічні залишки організмів) переходять з водної фази в донні відкладення. При дефіциті кисню у водоймах виникають заморні явища, окислювальні процеси сповільнюються, обумовлюючи погіршення якості води, відбувається накопичення в ній марганцю, заліза, амонійного азоту, неорганічного фосфору, органічних сполук, а також підвищення токсичності водного середовища [1, 2]. Переважна більшість водних мешканців — аеробні організми, тому зниження вмісту кисню нижче критичних значень призводить до їх загибелі.

Коли мова йде про руслові водосховища, то для них характерні наступні екологічні проблеми: зниження швидкостей течій, замулення ложа, ерозія берегів, накопичення органічних речовин. Внаслідок недостатнього перемішування водних мас і освітлення, в них взимку і влітку біля дна спостерігається дефіцит розчиненого кисню. Тут формуються анаеробні умови які сприяють міграції речовин з донних відкладень, які стають джерелом вторинного забруднення водної товщі. В умовах кліматичних змін цей процес може ускладнюватися через збільшення температури води, як одного з вагомих чинників у формуванні дефіциту кисню в літній час.

У випадку коли на руслових водосховищах встановлені гідроелектростанції, то часто забір води відбувається із значних глибин, де вода слабо насичена киснем. Це, в свою чергу, викликає у водних екосистемах, які розташовані нижче греблі ГЕС зниження концентрації розчиненого у воді кисню з усіма відповідними негативними наслідками [3–8].

З метою попередження негативних явищ, які викликає нестача розчиненого у воді кисню, і з метою покращення екологічного стану гідроекосистем було розроблено багато способів аерації водної товщі [1, 9, 10]. За однією з класифікацій їх можна

поділити на чотири типи: гравітаційні або кінетичні (водоспади, пороги та водоскиди), дифузійні (пневматичні), гідродинамічні (турбінні) та механічні. Існують конструкції, у яких поєднуються різні типи аераторів. За місцем розташування аераційні установки поділяють на поверхневі та придонні. Позитивний вплив аераційних установок розглянуто у ряді наукових публікацій, присвячених даній проблемі [1, 11, 12]. Недоліками пропонованих установок поза аквакультурою є не тільки висока вартість реалізації, а і проблема забезпечення живленням для роботи, обслуговуванням, складністю практичної реалізації аерації, коли йде мова про значні об'єми води на відкритих водоймах.

Актуальним рішенням цих проблем на рівнинних річках, які зарегульовані ГЕС, є організація аерації води безпосередньо на гідроагрегатах електростанцій, коли відбувається насичення киснем води, що проходить гідроагрегати. Тим самим вирішується проблема критичного дефіциту кисню у нижче розташованих гідроекосистемах. Існує ціла низка робіт із вивчення питання впровадження аерації на різних гідроагрегатах електростанцій [13–23].

Напевно найпоширенішими є аерація у камері гідротурбіни або аерація води перед надходженням до турбіни. Якщо аерація відбувається до гідротурбіни, то у цьому випадку відбувається ще і аераційний захист гідробіонтів. За рахунок аерації потоку, що йде на робоче колесо турбіни, досягається різке зниження перепадів тиску і виключається кавітація в камері робочого колеса, де при звичайних режимах з цієї причини гине частина планктону і риб. Застосування режиму аераційного захисту дозволяє значно зменшити загибель і травмування гідробіонтів, які проходять проточний канал турбіни без пошкоджень. Окрім цього поліпшуються експлуатаційні характеристики турбін: виключається кавітаційна ерозія, знижуються вібрації і шум, зменшується знос устаткування, тощо [24–26].

Досвід аерації в різних умовах і на різного типу турбінах з метою поліпшення ситуації із розчиненим киснем у руслах річок нижче ГЕС розглянуто у відповідних оглядах [19, 20, 22, 27]. На конференціях та у технічних звітах автори свідчать, що аерація гідротурбіни — це ефективний метод підвищення вмісту розчиненого кисню у скидних водах [18, 22].



**Таблиця 1.** Результати вимірювань концентрації розчиненого кисню на трьох станціях відбору проб на Каховській ГЕС під час проведення випробувань аераційної установки

Точки відбору проб	1	2	2	2	3	3	3
Процес аерації	ні	так	так	ні	так	так	ні
Навантаження	0	I	II	II	I	II	II
Конц. кисню, мгО <sup>2</sup> /дм <sup>3</sup> (Сер.арифм.)	7,40	7,43	7,60	7,45	7,69	7,76	7,35
Похибка середнього	0,00	0,03	0,00	0,05	0,08	0,12	0,05
Насиченість, %	89,3	89,3	91,7	89,9	92,3	92,6	88,7

На сьогодні у світі продовжуються роботи із вивчення інновацій в процесах аерації на гідроелектростанціях [28, 29] та тривають роботи із подальшого обладнання старих гідроелектростанцій системами аерації [30, 31].

В Україні питання штучної аерації води на гідроелектростанціях досі не піднімалось. В першу чергу можливість застосування аерації слід розглядати для Дніпровського каскаду водосховищ, які акумулюють та забезпечують транзит величезних об'ємів води. Окрім типових для річкових водосховищ проблем, для водосховищ Дніпра характерне масове і тривале «цвітіння» води, що ще більше загострює проблему дефіциту кисню в придонних шарах води і посилення процесів вторинного забруднення водних мас. Враховуючи світовий позитивний досвід запровадження аерації на гідроагрегатах ГЕС, доречно розглянути таку можливість і для головної водної артерії нашої держави.

Метою нашої роботи було на прикладі Каховської ГЕС вивчити технічну можливість аерації води що проходить крізь гідроагрегат та попередньо оцінити ефективність процесу аерації.

Була розроблена Програма випробувань аераційної установки з компресором потужністю 75 кВт, яка забезпечувала подачу стисненого повітря (тиск 2 атм) за допомогою перфорованої труби в супутній потік води на глибині 10,4 м в районі сміттеутримуючої решітки шостого гідроагрегату Каховської ГЕС. Відповідно до розробленої Програми екологічних вимірювань та відбору проб води дослідження проводили на трьох точках: Точка 1 – до гідроагрегатів, в колодязі в районі сміттеутримуючої решітки, Точка 2 – на водовипуску з гідроагрегату і Точка 3 – на відстані 65 м від водовипуску з гідроагрегату.

На точках відбору проб визначали вміст розчиненого кисню і вимірювали температуру води. З однієї точки відбирали дві проби із інтервалом 10–20 хвилин окремими зануреннями батометра. Повторність відбору проб з одного занурення батометра – 2. Порядок відбору проб води, зберігання та їх транспортування виконували відповідно з нормативними документами: ДСТУ ISO 5667-2 «Настанови щодо методів відбирання проб», ДСТУ

ISO 5667-3 «Настанови щодо зберігання та поводження с пробами», ДСТУ ISO 5667-6 «Настанови щодо відбирання проб з річок та струмків». Додатково враховуючи вимоги Інструкції з відбирання, підготовки проб води і ґрунту для хімічного та гідробіологічного аналізу гідрометеорологічними станціями і постами (Затверджена наказом ДСНС України 19.01.2016 № 30) .

Кваліфікований аналіз води було виконано Лабораторією моніторингу вод і ґрунтів Басейнового управління водних ресурсів нижнього Дніпра Державного агентства водних ресурсів України (свідоцтво про визнання технічної компетентності № LB 28/19 від 16 січня 2019 року).

Визначення концентрації розчиненого кисню та вимірювання температури здійснено за наступними методиками: МВВ № 081/12-0008-01 (Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації розчиненого кисню методом йодометричного титрування за Вінклером) і МВВ № 081/12-0311-06 (Методика виконання вимірювань температури).

Випробування аераційної установки відбулось 22 серпня, під час якого проведено кваліфікований відбір проб води і вимірювання температури. Для аналізу отриманих даних були застосовані статистичні методи [32], з використанням програми для статистичної обробки даних PAST v.3.26 [33].

Оброблені дані з протоколів вимірювань розчиненого кисню зведено у Табл. 1 та представлено у вигляді діаграми на Рис. 1.

З таблиці видно, що при проходженні води крізь гідроагрегати із включеною аераційною установкою спостерігається підвищення концентрації розчиненого у воді кисню на точках 2 і 3 в порівнянні із вихідною концентрацією (7,40 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>) кисню до гідроагрегату (Точка 1). Найбільша концентрація розчиненого кисню була відмічена на третій точці (на відстані 65 м від водовипуску) відбору проб: 7,69 і 7,76 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>, відповідно при першому і другому навантаженні. На другій точці (водовипуск із гідроагрегату) концентрація розчиненого кисню була меншою: 7,60 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup> при першому і 7,45 мгО<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup> при другому навантаженні. Ми це пояснюємо тим, що на другій точці відбору візуально направлений потік води не прослідковувався, спостерігались інтенсивна турбуленція і зворотні течії, а беручи до уваги, що під час аерації пухирці повітря після виходу із гідротурбін миттєво не спливають, а продовжують ще деякий час знаходитись у товщі води і поступово підійматись до поверхні, можна припустити, що насичення води киснем продовжується ще певну відстань, що і призводить до більших значень на більш віддаленій третій точці. Є свідчення інших авторів, що за результатами польових випробувань значна частина кисню переходить до



розчиненого стану не одразу, і рівень розчиненого кисню все ще може збільшуватись аж до 300 м нижче за течією від електростанції.

Для оцінки статистичної значущості різниці між середніми арифметичними значеннями на різних точках досліджень з різними навантаженнями було застосовано критерій Манна-Уїтні [32]. При порівнянні середніх значень концентрацій кисню на третій і першій точках значення *p*-критерію Манна-Уїтні було меншим 0,03, тобто різниця є статистично значущою, що дає змогу впевнено стверджувати про результативність процесу аерації як при першому так і другому навантаженнях.

Для оцінки ефективності аерації застосовують спеціальний показник (*E*) – ефективність передачі кисню (oxygen transfers efficiency) або ефективність аерації [34, 35]:

$$E = \frac{C_d - C_o}{C_s - C_o} \times 100 \%$$

де *C<sub>d</sub>* – концентрація розчиненого у воді кисню після аерації, *C<sub>o</sub>* – концентрація розчиненого у воді кисню до аерації, *C<sub>s</sub>* – рівноважна концентрація розчиненого у воді кисню.

Ефективність аерації залежить від вихідного дефіциту розчиненого кисню, способу аерації (конструкція та місце надходження повітря), відсотку повітря у воді, величини витрат води, температури води, тощо [36]. Із досвіду працюючих у світі установок у більшості випадків ефективність аерації складає 10–50%.

Для природних поверхневих об'єктів відомо [37], що чим більше дефіцит, тим сильніше відбувається поглинання кисню з повітря. Результати експериментів [38] вказують, що швидкість насичення води киснем при струмовій аерації значно уповільнюється із зростанням насиченості. Це підтверджується і іншими результатами експериментів, коли аналізували насичення киснем знекисненої води різними аераторами. З даних [39] видно, що швидкість розчинення кисню у воді знижується при зростанні його концентрації у воді. В роботі [40] зазначається, що «ефективність аерації різко падає, коли концентрація наближається до рівноважної».

В результаті розрахунку ефективності аерації під час випробувань на шостому гідроагрегаті Каховської ГЕС отримані доволі високі значення ефективності аерації, так за результатами вимірювань у Т.3 при першому навантаженні *E* = 32,6%, а при другому *E* = 40,4%. Враховуючи те, що вихідна концентрація кисню доволі близька до рівноважної (насичення 89,3%), а це, як розглядалось вище, суттєво ускладнює процес розчинення кисню, можна зробити висновок про значну продуктивність аераційної установки.

Ефективність аерації, як зазначалось вище, залежить від багатьох чинників і нажаль теоретич-

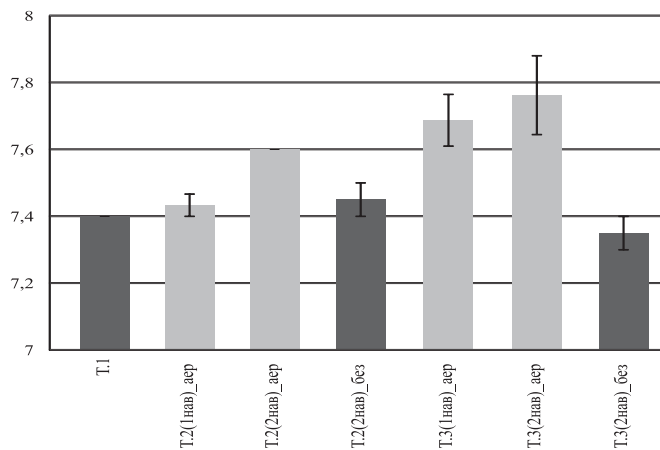
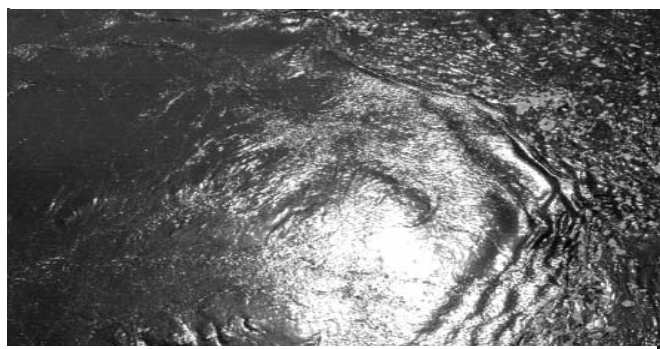


Рис. 1. Діаграма середніх значень вмісту кисню (мг/дм<sup>3</sup>) на трьох точках відбору проб, вуса (whisker) – похибка середнього арифметичного.

но розрахувати ефективність аерації в умовах значного дефіциту кисню вкрай складно і тому лише експериментальні дослідження в умовах низького насичення води киснем зможуть в повній мірі оці-



Співробітники ПрАТ «Укргідроенерго» під час проведення випробувань



Аерована вода після проходження через гідроагрегат



Фіксація проб води лабораторією моніторингу вод і ґрунтів Басейнового управління водних ресурсів нижнього Дніпра Державного агентства водних ресурсів України



нити роль застосування системи аерації води. Ще одним важливим моментом є те, що рівень розчиненого кисню все ще може збільшуватись нижче за течією електростанції внаслідок повільного спливання дрібних пухирців повітря. Тобто під час наших випробувань ми можливо зафіксували не максимальне насичення, і тільки додаткові дослідження дадуть відповідь на це питання.

Таким чином, отримано позитивний досвід можливості аерації води, яка проходить крізь гідроагрегати ГЕС, під час випробувань аераційної установки на шостому гідроагрегаті Каховської ГЕС, досягнуто збільшення вмісту розчиненого кисню у воді нижче ГЕС. Аераційна установка продемонструвала значну ефективність процесу аерації в умовах високого вихідного насичення води киснем. Отримані результати та аналіз досвіду застосування аераційних установок у світі дозволяють розглядати аерацію як ефективний засіб у критичних для гідроекосистем умовах і рекомендувати подальше вивчення питання впровадження аераційних установок на агрегатах ГЕС України.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Рябов А.К., Сиренко Л.А. Искусственная аэрация природных вод. – Киев: Наук. думка, 1982. – 204 с.
2. Linnik P.N., Timchenko O.V., Zubko A.V. et al. Oxygen regime of the water bodies as main factor of different metals forms migration within the system "bottom sediments – water" // Hydrobiol. J. – 2009. – Vol. 45, N 2. – P. 85–105.
3. Гидроэнергетика и окружающая среда / Под. общ. ред. Ю. Ландау, Л. Сиренко: Монография. – К.: Либра, 2004. – 484 с.
4. Водохранилища и их воздействия на окружающую среду / Под ред. Г.В. Воропаева и А.Б. Авакяна. – М., 1986. – 368 с.
5. Жукинський В.Н., Журавлева Л.А., Россова Э.Я. [и др.] Днепровско-Бугская эстуарная экосистема: монографія / Жукинський В.Н., Журавлева Л.А., Россова Э.Я. [и др.]; отв. ред. Ю.П. Зайцев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 236 с. – ISBN 5-12-000803-8.
6. Биологические и химические эффекты антропогенного эвтрофирования Ижевского водохранилища: Монография / Под ред. Б.Г. Котегова. – Ижевск: Удмуртский университет, 2013. – 177 с.
7. Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. – Киев: Наук. думка, 1987. – 164 с.
8. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидрологогидрохимические аспекты / Ю.С. Даценко. – Москва: ГЕОС, 2007. – 252 с
9. Уитон Ф. Техническое обеспечение аквакультуры: пер. с англ. – М.: Агропромиздат, 1985. – 528 с.
10. Моисеев Н.Н. Рыбохозяйственная гидротехника с основами мелиорации: учеб. пособие / Н.Н. Моисеев, П.В. Белоусов; Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск, 2010. – 192 с.
11. Beutel M.W., Horne A.J. A review of the effects of hypolytmetic oxygenation on lake and reservoir water quality // J. Lake Reservoir management. – 1999. – Vol. 15, N4. – P. 285–297.
12. Biological Effects Of Artificial Destratification And Aeration In Lakesand Reservoirs-Analysis And Bibliography. Bur Reclam Rep REGERC-72-33. Div Gen Res. O n 1972. Bureau of Reclamation, Denver, 117 p. 19flg. 337 ref
13. Papillon B., Sabourin M., Couston M. and Deschenes C. 2002 Methods for air admission in hydroturbines Proc.of the XXIst IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne
14. Bunea F., Ciocan G.D., Bucur D.M. and Dunca G. 2014 Aeration solution of water used by hydraulic turbines to respect the environmental policies published in: Electrical and Power Engineering, 2014 International Conference and Exposition on, publisher IEEE pp. 1015-1020, DOI 10.1109/ICEPE.-2014.6970062
15. March P.A., Brice T.A., Mobley M.H., Cybularz J.M., (1992), Turbines for solving the DO dilemma, Hydro Review, 11, 30-36.
16. March, P.A. Hydropower Technology Roundup Report: Technology Update on Aerating Turbines, Report No. 1017966, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2009.
17. March, P.A. "Hydraulic and Environmental Performance of Aerating Turbine Technologies," EPRI-DOE Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines: Technical Papers, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI) and Washington, D.C.: U. S. Department of Energy (DOE), Report No. 1024609, December 2011.
18. Hopping, P. N., March P. A. and Wolff P. J. "Justifying, Specifying, and Verifying Performance of Aerating Turbines," Proceedings of HydroVision 98, Reno, Nevada, July 28-31, 1998.
19. March, P., Jacobson, P., 2015. Industry experience with aerating turbines. In: Proceedings of HydroVision 2015. Portland, Oregon.
20. Assessment of Aerating Hydroelectric Turbine Developments and Related Research Needs. EPRI, Palo Alto, CA: 2013.
21. Water Quality Standards and Hydropower Release Executive Summary // Prepared by Grand River Dam Authority. – Langley. – 2018. –31 p.
22. Papillon B., Sabourin M., Segoufin C. and Gaudin E. (2011) The technical challenges of dissolved oxygen enhancement EPRI/DOE Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines, Report No. 1024609 (Palo Alto, USA).
23. Gulliver, John S.; Tank, Julie A.; Hibbs, David L.. (1998). Investigation of Aeration Alternatives For Buford Dam, Georgia. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy.
24. Маслов А.С. Решение задач защиты планктона и ихтиофауны в проточных каналах турбин ГЭС / МАСЛОВ А.С., С.-Петербург. гос. лесотехн. акад.. – СПб, 2006. – 10 с. – Деп. В ВИНТИ 15.05.2006, №: 654-B2006 .
25. Постоев В.С. Обоснование разработки нормативной базы на основе модели технологического нормирования в связи с разрушениями экосистем рек турбинами ГЭС / Постоев В.С., Маслов А.С., Ахметшин И.Ф., С.-Петербург. гос. лесотехн. акад. – СПб, 2006. – 6 с. – Деп. В ВИНТИ 15.05.2006, №: 651-B2006.
26. Обоснование способа аэрационной защиты экосистем водоемов от воздействия гидромашин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / Ю. В. Шабалин. - СПб., 2004. - 20 с.
27. EPRI, Assessment and Guide for Meeting Dissolved Oxygen Water Quality Standards for Hydroelectric Plant Discharges, Report No. GS-7001, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), November 1990.
28. Experimental analysis of the operation of a small Francis turbine equipped with an innovative aeration device // D M Bucur et al 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 240 042010
29. Bunea F., Ciocan G., Nedelcu A. Bucur D., Dunca G., Chihaiia R. (2017). Experimental setup for the study of new aeration devices in hydraulic turbines. Environmental Engineering and Management Journal. 16. 1033-1040. 10.30638/eemj.2017.105.
30. Cube Hydro to upgrade High Rock project with GE aer-



ating turbines DENVER 06/30/2017, By Michael Harris , Associate Editor <https://www.hydroworld.com/articles/2017-06/cube-hydro-to-upgrade-high-rock-project-with-ge-aerating-turbines.html>

31. *Aeration* Methods to Enhance Summer Dissolved Oxygen in the Wallace Dam Tailrace Area. Study Report. Wallace Dam Hydroelectric Project, FERC Project Number 2413. – 2017. – 56 p.

32. *Rosner B.* Fundamentals of biostatistics. 8th ed. Cengage Learning; 2016.

33. *Hammer, III., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.* 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp.

34. *Thompson E.J., Gulliver J.S.* "Oxygen Transfer Similitude for Vented Hydroturbine," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, 1997.

35. *Vahl T.L.* Venting hydroturbines for dissolved oxygen enhancement // *Water Resources Research Laboratory*. Denver, Colorado 1995. – 14p.

36. *EPRI-DOE* Conference on Environmentally-Enhanced Hydropower Turbines: Technical Papers. EPRI, Palo Alto, CA, and U.S. Department of Energy, Washington, D.C.: 2011. – 266 p.

37. *Монгайт И.Л., Родзиллер И.Д.* Методы очистки сточных вод. М.: Гостопттехиздат, 1958.

38. *Помогаева В.В.* Повышение эффективности струйной аэрации естественных водоемов и биологических прудов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / В. В. Помогаева. - М., 2009. - 16 с

39. *Серпюкрялов Н.С., Смоляниченко А.С., Лесников И.И.* Сравнительная оценка аэраторов для очистки сточных вод по обобщенному критерию аэрации // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2011. Вып. №2. С. 97-101.

40. *Vohas, Charles E., et al.* 1983. "Techniques for Reaeration of Hydropower Releases," Technical Report E-83-5, prepared by Tennessee Valley Authority for the U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

© Кучер С.В., Гуляева О.О., Усов О.Є., 2019

