

УДК 628.356

**Барибін О.І., к.т.н.**

Донецький національний університет імені Василя Стуса

**ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЕРАЦІЇ В ЧИСТІЙ ВОДІ**

*В статті розглянуто особливості методики виконання вимірювань коефіцієнту об'ємного масопереносу кисню, яка описана у стандарті організації ASCE (American Society of Civil Engineers) та застосовується під час використання найбільш вживаного методу змінного дефіциту кисню для визначення ефективності аерації. Наведено результати експериментальних досліджень величини концентрації розчиненого кисню, коефіцієнту об'ємного масопереносу кисню, окислювальної здатності та ефективності аерації у динаміці під час визначення величини ефективності аерації для різних режимів роботи пневматичного аератора власної розробки. Показано, що формули, які застосовуються на сьогоднішній день для обчислення коефіцієнту об'ємного масопереносу кисню (і відповідно окислювальної здатності і ефективності аерації) не можуть бути коректно використані для порівняння характеристик аераторів при значеннях величини концентрації розчиненого у воді кисню близьких до концентрації насичення. Рекомендовано проводити обчислення ефективності аерації при фіксованому значенні концентрації розчиненого у воді кисню, наприклад, 2, 3 або 4 мг/л.*

**Ключові слова:** аерація води, ефективність аерації, окислювальна здатність.

**Вступ.** Аерація, як процес збагачення води киснем повітря, найчастіше застосовується в системах очистки стічних вод з активним мулом, де вона є необхідною умовою протікання процесу біохімічного окислення забруднень. Вибір способу аерації для конкретної очисної установки залежить від багатьох факторів, але ключовим є ефективність пристроїв, які використовуються для процесу, що розглядається. Існує велике різноманіття конструкцій таких пристроїв (аераторів): барботажні, механічні, струменеві тощо [1]. Для оцінки ефективності аераторів базовим параметром визнано ефективність аерації  $E$  – кількість кисню, що розчиняється у воді, що очищується, при енерговитратах на аерацію в 1 кВт•год [2].

Очевидно, що коректність порівняння між собою величини цього параметру для різних конструкцій аераторів може впливати на прийняття рішення щодо їх вибору, тому постійний перегляд та вдосконалення методики визначення ефективності аерації є актуальною проблемою.

Відповідно метою роботи є детальний аналіз методики виконання вимірювань ефективності аерації та формування рекомендацій щодо її вдосконалення.

**Постановка завдання.** На практиці ефективність аерації  $E$  обчислюється за формулою:

$$E = \frac{OЗ}{N_{ном}t}, \quad (1)$$

де  $OЗ$  – окислювальна здатність,

$N_{ном}$  – номінальна споживана потужність аератора, кВт/год,

$t$  – час процесу аерації, годин.

У формулі (1) величину параметру  $N_{ном}$  можна взяти із технічної документації аератора, а визначення часу аерації не являє собою серйозної метрологічної проблеми. Відповідно на валідність результатів визначення  $E$  впливає те, яким чином було визначено  $OЗ$ . Як відомо з [3-7], окислювальна здатність аератора визначається за формулою:

$$OЗ = K_{La} \times C_s \times V_g, \quad (2)$$

де  $K_{La}$  – об'ємний коефіцієнт масопереносу, 1/с,

$C_s$  – концентрація насичення води киснем при даних атмосферному тиску і температурі води (визначається за відповідними таблицями [8]), мг/л,  $V_g$  – обсяг води, що аерується, м<sup>3</sup>.

Очевидно, що визначення  $OЗ$ , у свою чергу, базується на визначенні об'ємного коефіцієнту масопереносу кисню  $K_{La}$ , яке здійснюється експериментальним шляхом за допомогою таких методів [4]:

1. метод прямого окислення сульфїту натрію;
2. метод змінного дефіциту кисню;
3. метод змінного дефіциту кисню для стїчної води з активним мулом;
4. метод постійного дефіциту кисню;
5. метод балансу кисню в повітрі.

Найбільш вживаним серед них для визначення ефективності аерації є метод змінного дефіциту кисню, який, в тому числі, рекомендований як базовий для визначення окислювальної здатності (англ. standard oxygen transfer rate) за методикою виконання вимірювань, яка описана у стандарті організації ASCE (American Society of Civil Engineers) [3], є обов'язковою до застосування у США і широко використовується на добровільних засадах по всьому світу.

Не вдаючись у деталі зазначимо, що для реалізації вищезгаданої методики до резервуару з чистою водою вводять сульфїт натрію в кількостях необхідних для повного видалення кисню з рідини [6, 9]. Відповідно до [10] для видалення 1 мг/л кисню необхідно 7,9 мг сульфїту натрію. Після цього воду аерують і через певні проміжки часу фіксують рівень розчиненого кисню. Об'ємний коефіцієнт масопереносу кисню визначається за формулою [5-7, 11]

$$K_L a = \frac{2,303[\lg(C_S - C_n) - \lg(C_S - C_k)]}{t}, \quad (3)$$

де  $C_n$  – початкова концентрація кисню  $C_n < (0,2 \cdot C_S)$ ,

$C_k$  – кінцева концентрація кисню  $C_k > (0,98 \cdot C_S)$ .

Наукові публікації, які стосуються цієї методики, пов'язані з такими її особливостями:

- можливість її використання в умовах забрудненої води [11];
- визначення покриття об'єму очисного резервуару експериментальними точками [12];
- порівняння із авторськими моделями масопереносу кисню [13, 14].

Перераховані вище роботи не ставлять під сумнів саму методику, але її особливістю є те, що вона не передбачає врахування проміжних значень концентрації розчиненого кисню  $C_i$  ( $C_n < C_i < C_k$ ). Відповідно основним завданням роботи є отримання експериментальних значень концентрації розчиненого кисню  $C$ , коефіцієнту об'ємного масопереносу кисню  $K_L a$ , окислювальної здатності  $O_3$  та ефективності аерації  $E$  у динаміці під час визначення величини  $E$  для різних режимів роботи пневматичного аератора власної розробки [15] та аналіз можливості використання  $C_i$  для оцінки ефективності аерації.

**Методи дослідження.** Вимірювання зазначених вище параметрів проводилися на експериментальному стенді, схема якого наведена на рис. 1.

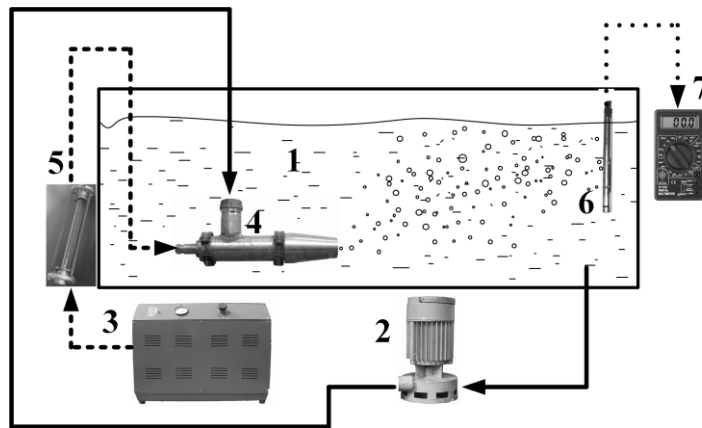


Рис. 1. Схема експериментального стенду: 1 - обсяг рідини, що аерується; 2 - електронасос БЦ-1.1-18-У1.1; 3 - компресорна установка УК40-2М; 4 - пневматичний аератор; 5 - ротаметр РМ-2,5ГУЗ; 6 - киснемір; 7 - цифровий мультиметр.

Для вимірювання розчиненого у воді кисню використовувався киснемір ДК-404 [16], який включає в себе перетворювач концентрації кисню в напругу і модуль струмового виходу, що перетворює напругу в вихідний струм кисневого датчика. Принцип роботи киснеміра такий: електроди занурені в розчин електроліту, який відділений від аналізованого середовища мембраною, проникною для кисню, але непроникною для рідини і парів води; кисень з середовища, що аналізується, дифундує через мембрану в тонкий шар електроліту між катодом

і мембраною і вступає в електрохімічну реакцію на поверхні катода, який поляризується під дією зовнішньої напруги, яка прикладена між електродами. При цьому в датчику виробляється сигнал постійного струму, який надходить на цифровий мультиметр та фіксується кожні 5 секунд.

Об'єм рідини установки складає  $1 \text{ м}^3$ . Робота аератора забезпечується насосом для подачі води і компресорної установкою для подачі повітря.

Експеримент проходить за наступною схемою:

1. Проводиться установка необхідної витрати води.
2. В обсяг рідини відповідно до показань киснеміра вводиться розчин сульфату натрію.
3. Після того, як розчинений кисень зв'язується, включається компресор і вентилем, установленим перед ротаметром, встановлюється необхідна витрата газу.
4. Проводиться запис показань цифрового мультиметра.

Повна похибка вимірювання концентрації розчиненого кисню у відповідності з рекомендаціями зазначеними в [16] становить

$$\sigma_C = \pm (0,08 + 0,042C_i), \quad (4)$$

де  $C_i$  – поточне значення концентрації розчиненого кисню, мг/л.

Для експериментальних досліджень були обрані 4 режими з витратами води  $Q_{вод}$  і повітря  $Q_{пов}$ : P1 –  $Q_{вод} = 9,2 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $Q_{пов} = 4,5 \text{ м}^3/\text{год}$ ; P2 –  $Q_{вод} = 9,2 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $Q_{пов} = 2,3 \text{ м}^3/\text{год}$ ; P3 –  $Q_{вод} = 7,7 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $Q_{пов} = 4,5 \text{ м}^3/\text{год}$ ; P4 –  $Q_{вод} = 7,7 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $Q_{пов} = 1,9 \text{ м}^3/\text{год}$ .

**Результати експерименту.** Наведені на рис. 2 дані показують класичну картину зростання концентрації розчиненого у воді кисню. Дійсно, відповідно до загальноприйнятих теорій рушійною силою процесу аерації є різниця концентрації насичення  $C_s$  і концентрації в даний момент часу  $C_i$  [4, 17]. Відповідне зменшення градієнта концентрації розчиненого кисню, яке пов'язане з наближенням значення  $C_i$  до  $C_s$  викликає зменшення швидкості переносу кисню в воду. Слід зазначити, що максимальна величина похибки вимірювання концентрації розчиненого кисню відповідно до формули (4) складала  $\pm 0,5 \text{ мг/л}$ , тобто не виходила за межі 5% (на рис. 2 не наведена).

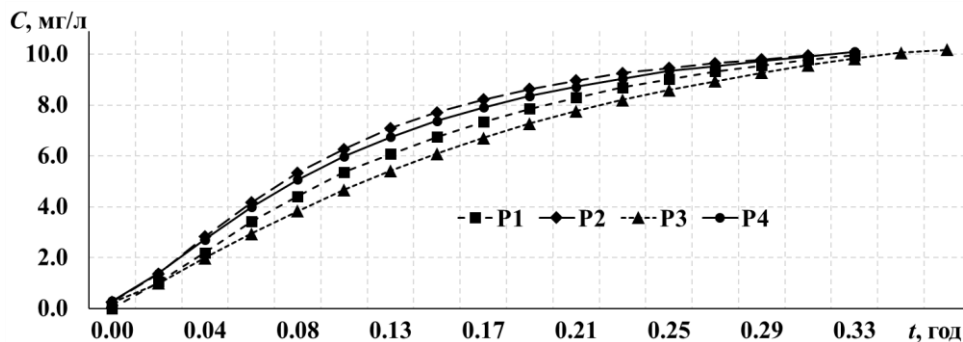


Рис. 2. Динаміка зміни концентрації розчиненого у воді кисню

Дані зміни величини  $K_L a$  для різних режимів подібні (рис. 3). При цьому характерно прискорення зростання  $K_L a$  на початку і в кінці процесу аерації.

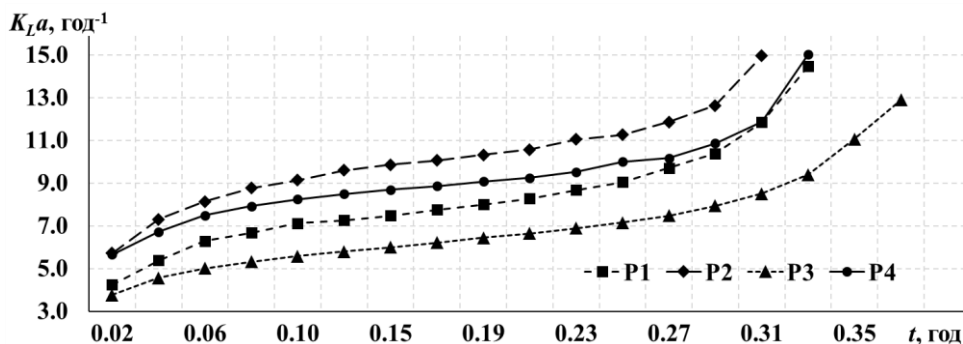


Рис. 3. Динаміка зміни величини коефіцієнту об'ємного масопереносу кисню

Трохи інша картина спостерігається для динаміки окислювальної здатності (рис. 4), графіки якої для різних режимів так само подібні. Однак, слід зазначити істотне прискорення зростання окислювальної здатності лише в кінці процесу аерації, тобто при концентраціях розчиненого кисню, що наближаються до концентрації насичення. Пояснення такої поведінки буде дано нижче.

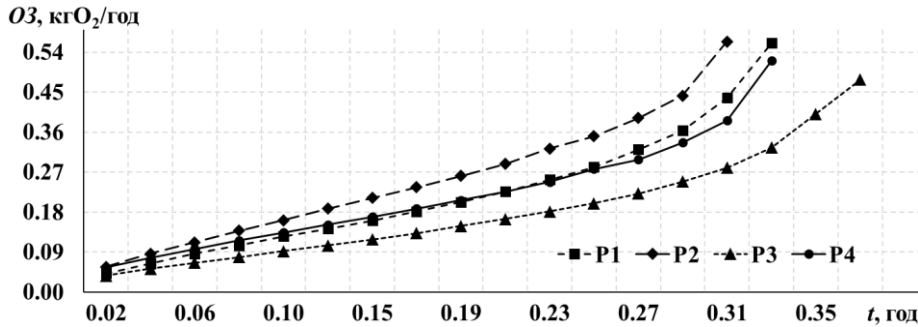


Рис. 4. Динаміка зміни величини окислювальної здатності

На перший погляд, характер поведінки кривих на рис. 5 може говорити про те, що найбільш ефективною є аерація при високих і при низьких градієнтах концентрації розчиненого кисню в рідині.

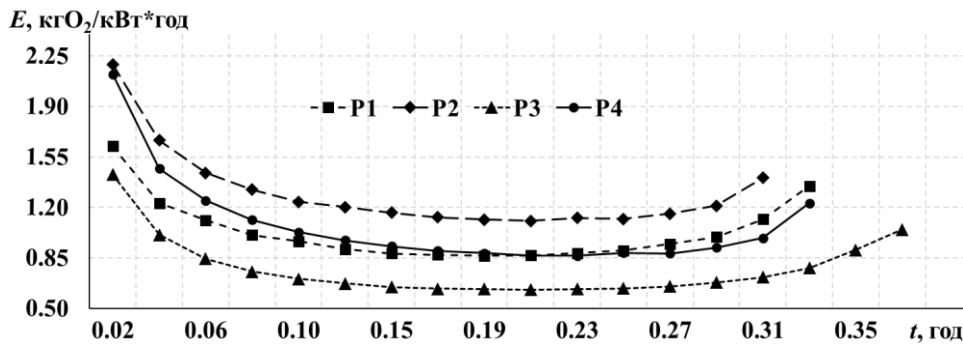


Рис. 5. Динаміка зміни величини ефективності аерації

Дійсно, при великих градієнтах високу ефективність можна пояснити високою швидкістю перенесення кисню. Однак, очевидно, що ефективність аерації не може рости, коли збільшення кількості споживаної енергії вже не призводить до насичення води киснем. Можна припустити, що при низьких градієнтах розчиненого у воді кисню зростання ефективності аерації, як і зростання окислювальної здатності та об'ємного коефіцієнта масопереносу, може бути пояснене тільки видом формули (3) для обчислення  $K_L a$ , за якою при  $C_s - C_i \rightarrow 0$  відбувається різке нелінійне зростання значення логарифма цієї різниці (рис. 16).

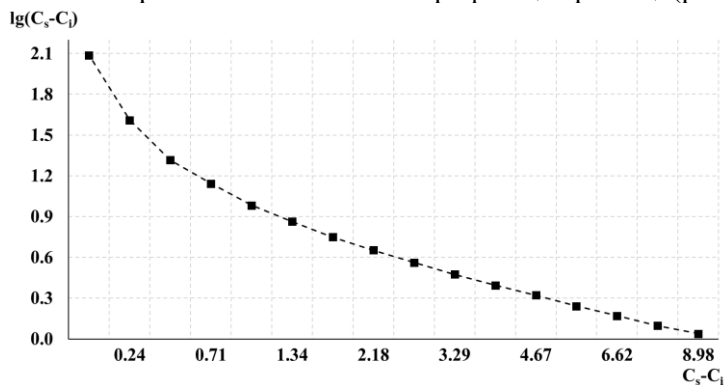


Рис. 6. Приклад залежності величини логарифма  $C_s - C_i$  від величини  $C_s - C_i$  для режиму P1

Такі дані ставлять під сумнів достовірність отриманих дослідниками результатів, у зв'язку з тим, що вони, наводячи дані про ефективність аерації, не вказують при якому значенні  $C_s - C_k$  проводилися обчислення.

**Висновки.** Результати, які отримані під час аналізу залежностей концентрації розчиненого кисню  $C$ , об'ємного коефіцієнта масопереносу  $K_L a$ , окислювальної здатності  $O_3$  і ефективності аерації  $E$  від часу аерації, потребують додаткової перевірки для більшої кількості режимів роботи аератора, що використовувався, та застосування аераторів інших моделей. Однак навіть зараз можна зробити висновок про те, що формули, які застосовуються на сьогоднішній день для обчислення  $K_L a$  (і відповідно  $O_3$  і  $E$ ) не можуть бути коректно використані для порівняння характеристик аераторів при значеннях  $C_k$  близьких до  $C_s$ , при тому, що саме цього вимагає загальноживана методика виконання вимірювань.

З огляду на те, що підвищення вмісту розчиненого кисню вище 3,5-4 мг/л мало впливає на ефективність біохімічного окислення забруднюючих речовин [1], можна рекомендувати проводити обчислення ефективності аерації при фіксованому значенні  $C_k$ , наприклад, 2, 3 або 4 мг/л.

### Інформаційні джерела

1. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Жмур Н. С. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
2. Ba'ba'a H. B. M. Al A New Correlation for Predicting Aeration Efficiency for Air Diffused Systems : Master of Science Thesis / H. B. M. Al Ba'ba'a. – University of Wisconsin-Milwaukee, 2015. – 67 p.
3. Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water: ASCE Standard, ASCE/EWRI 2-06. American Society of Civil Engineers, 2007 – 32 p.
4. Сивак В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1984. – 124 с.
5. Худенко Б. М. Аэраторы для очистки сточных вод / Б. М. Худенко, Е. А. Шпирт – М. : Стройиздат. 1973. – 112 с.
6. Орлов А. В. Интенсификация работы очистных сооружений с применением пневмогидравлических аэраторов : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд техн наук : специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" / А. В. Орлов . – Иркутск, 2009. – 18 с.
7. Помогаева В. В. Интенсификация работы струйных аэраторов при насыщении воды атмосферным кислородом / В. В. Помогаева, И. Ю. Пурусова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – Vol. 2. – С. 48–50.
8. Кузьмина И. А. Содержание растворенного кислорода в воде: Методические указания / Кузьмина И. А. – НовГУ, Великий Новгород, 2007. – 12 с.
9. Андреев С. Ю. Интенсификация работы канализационных очистных сооружений с использованием диспергированных водовоздушных смесей : автореф. дисс. на соискание ученой степени док. техн. наук : специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" / С. Ю. Андреев . – Пенза, 2009. – 35 с.
10. Фрог Б. Н. Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко – М. : Издательство МГУ, 1996 г. – 680 с.
11. Stenstrom M. K. Theory to practice: Oxygen transfer and the new ASCE standard. 79th WEFtec Conference / M. K. Stenstrom, S-Y. Leu, P. Jiang. – Dallas : Water Environment Foundation, 2006. – pp. 4838-4852
12. Muszyński-huhajło M. Accurate oxygen transfer efficiency measurements by off-gas method - tank coverage dilemma / M. Muszyński-huhajło, K. Janiak // Proceedings of ECOpole. – 2017. – Vol. 11(1). – pp. 45-53
13. Fandriks I. Alternative Methods for Evluation of Oxygen Transfer Performance in Clean Water : Master Thesis / I. Fandriks. – Uppsala : Uppsala University, 2011. – 101 p.
14. He Y. An Alternative Mathematical Model for Oxygen Transfer Evaluation in Clean Water / Y. He // Water & Wastes Digest. – 2016. – Vol.1. – pp. 1-10.
15. Барыбин А. И. Конструкция пневматического аэратора сточных вод, альтернативного эжекторным устройствам аэрации / А. И. Барыбин // Экология и промышленность. – 2010. – № 2. – С. 29-32. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolprom\\_2010\\_2\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolprom_2010_2_8)

16. Анализатор растворенного кислорода Марк-404 : руководство по эксплуатации. – Нижний Новгород, 2001. – 37 с.

17. Попкович Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С.Попкович, Б. Н. Репин. — М. : Стройиздат, 1986. — 136 с.

**Барыбин А.И.**

Донецкий национальный университет имени Василя Стуса

### ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭРАЦИИ В ЧИСТОЙ ВОДЕ

*В статье рассмотрены особенности методики выполнения измерений коэффициента объемного массопереноса кислорода, которая описана в стандарте организации ASCE (American Society of Civil Engineers) и применяется при использовании наиболее распространенного метода переменного дефицита кислорода для определения эффективности аэрации. Приведены результаты экспериментальных исследований величины концентрации растворенного кислорода, коэффициента объемного массопереноса кислорода, окислительной способности и эффективности аэрации в динамике при определении величины эффективности аэрации для различных режимов работы пневматического аэратора собственной разработки. Показано, что формулы, применяемые на сегодняшний день для вычисления коэффициента объемного массопереноса кислорода (соответственно, окислительной способности и эффективности аэрации) не могут быть корректно использованы для сравнения характеристик аэраторов при значениях величины концентрации растворенного в воде кислорода близких к концентрации насыщения. Рекомендовано проводить вычисления эффективности аэрации при фиксированном значении концентрации растворенного в воде кислорода, например, 2, 3 или 4 мг / л.*

**Ключевые слова:** аэрация воды, эффективность аэрации, окислительная способность.

**Barybin O.I.**

Vasyl' Stus Donetsk National University

### FEATURES OF THE AERATION EFFICIENCY MEASUREMENT IN PURE WATER

*The article discusses the features of the measurement procedure for the oxygen mass transfer coefficient, which is described in the American Society of Civil Engineers (ASCE) standard and is used for the most commonly used alternative deficit method to determine the aeration efficiency. The results of experimental studies of the dissolved oxygen concentration, the oxygen volumetric mass transfer coefficient, standard oxygen transfer rate and aeration efficiency in dynamics during determination of the value of aeration efficiency for different operating conditions of the pneumatic aerator of the own design are given. It is shown that the formulas used today to calculate the oxygen volumetric mass transfer coefficient (and, accordingly, standard oxygen transfer rate and aeration efficiency) can not be correctly used to compare the characteristics of aerators within values of the dissolved oxygen concentration in water close to the dissolved oxygen saturation concentration at standard conditions. It is recommended to calculate the aeration efficiency using a fixed value of the dissolved oxygen concentration in water, for example, 2, 3 or 4 mg/l.*

**Key words:** aeration of water, aeration efficiency, standard oxygen transfer rate.

Стаття надійшла до редакції 08.09.2018