

Миць М.Г., Білошенко К.С., к.фіз.-мат.н., доцент, Божков А.І., д.біол.н., професор

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ АЕРАЦІЇ ПІД ЧАС БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків

Ключові слова: очистка, стічні води, пристрій, коефіцієнт використання кисню (КВК).

Вступ. Мета цієї роботи – експериментальна перевірка та встановлення найбільш ефективного способу аерації, вдосконалення конструкції аераторів, розробка методики яка дозволить знизити енергоємність процесу аерації стічних вод. Наша держава на сьогодні має одну з найенергозатратніших економік в Європі [1]. В доповіді ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України» за 2013 рік, «Проблеми та перспективи створення сприятливого клімату для підвищення енергоефективності та енергозбереження в Україні» [2], вказується що, – «Неефективне споживання ПЕР призводить до необхідності додатково імпортувати більше 50 % загального обсягу енергоносіїв, що споживаються секторами національної економіки».

Оскільки на станціях біологічної очистки стічних вод майже 75 % загальних витрат енергоносіїв використовується на аерацію[3], тому, зменшення енерговитрат та вдосконалення процесу аерації, на часі, актуальне питання.

Аналіз наукових публікацій на цю тему [4–7] показує, що системи крупнопухіркової аерації, що використовуються сьогодні на більшості очисних споруд, не дивлячись на їх простоту виготовлення та відносну надійність експлуатації, не забезпечують високого ступеню використання кисню повітря, який подається на аерацію, а це, в свою чергу, призводить до зайвих витрат електроенергії.

Проаналізував роботи [5,6], в яких були обґрунтовані переваги поєднання дрібнопухіркової аерації та спрямованої циркуляції рідини, яка аерується, у вертикальному напрямку. В зазначених роботах відзначається, що для дрібнопухіркових аераторів підвищення глибини занурення практично не відбивається на ефективності аерації. Це також підтверджується теоретичними викладками в роботі [8].

Матеріали та методи дослідження. Вплив глибини занурення аераторів на коефіцієнт використання кисню (КВК) було перевірено на лабораторному обладнанні. Це прямокутна ємність висотою 5 м та підставою 0,2x0,2 метри, яка виготовлена з органічного скла. В придонну зону були вмонтовані аератори, дрібнопухіркової аерації, (який виготовлений з пористої керамічної труби), та крупнопухіркової аерації, виготовлений з пластикової перфорованої труби з отворами діаметром 5 мм. Аерацію проводили в розчині сульфату натрія, тому на протязі всього часу, коли проводився експеримент, в системі спостерігався дефіцит кисню. З цього робимо висновок, що всі результати отримані в зіставних умовах і відповідають максимальному значенню КВК для конкретного аератора. Відбір повітря після аерації відбувався на різних глибинах рідини, що аерується, в тому числі безпосередньо у поверхні аератора, тобто одразу після створення пухиря повітря, та його відриву від поверхні аератора.

Вміст кисню в повітрі, що надходило на аерацію та в відпрацьованому повітрі, яке виходило після аерації визначали за допомогою датчика розчиненого кисню AR8010. Для відбору проб використовували звичайні скляні газові воронки. Відбір проби газу, що відходить, робився за допомогою колоколоподібного відбірника, газової воронки спрямованої вниз раструбом. Її занурювали на необхідну глибину та зону рідини, що аерується за умовами експерименту. Воронка заповнюється під напором повітря за рахунок різниці між атмосферним та гідростатичним тиском. Істотно, що перед забором проби треба саму воронку та з'єднуючі шланги продути повітрям, що відбирається, щоб не сталося змішення атмосферного повітря з газом, що беруть для аналізу. КВК визначають як відсоткове або часткове відношення концентрацій кисню в газі що відходить після аерації та в повітрі яке поступає на аерацію.

Результати експерименту. В таблицю 1 зведені результати вимірюваного КВК, які отримані для дрібно- та крупнопухирцевих аераторів в залежності від глибини їх занурення, при цьому витрати повітря, були однакові.

Таблиця 1 – Глибина занурення (метри)/ КВК (%)

Тип аератора, діаметр пухирців (мм)	0,1 м	2,5 м	5,0 м
1. Дрібнопухирцевий 0,5–1,0	9,8	9,9	10,0
2. Дрібнопухирцевий 1,0–3,0	7,6	7,8	8,0
3. Крупнопухирцева 5,0–8,0	1,5	2,5	2,9
4. Крупнопухирцева 9,0–11,0	1,0	2,0	2,6
5. Крупнопухирцева з накладеною сіткою 9,0–11,0	1,0	2,5	3,0
6. Крупнопухирцева з накладеною сіткою, з утворенням суцільної повітряної фази	1,0	2,8	3,3

Результати вимірювань, відображені на рис. 1, наочно показують, що вплив глибини занурення аераторів з дрібнопухирцевою аерацією на значення КВК практично не впливає.

В той же час КВК для крупнопухирцевої аерації значно зростає якщо глибину занурення збільшувати. Проте, абсолютне значення КВК у всякому випадку більше для дрібнопухирцевої аерації, тобто для пухирців меншого діаметру. Сітки, які встановлювали на глибині 2,5 та 5 метрів, суттєво підвищували КВК. Але було встановлено, що коли пропускна здатність сітки не дозволяла всьому повітрю проходити крізь неї і під сіткою утворювалась суцільна повітряна фаза (тобто під сіткою проходила масова коалесценція пухирців), – КВК значно зростає.

У зв'язку з цим була проведена ще серія експериментів в лабораторному аеротенку (розміром 0.7 м x 0.7 м x 1,2 м, ємністю 500 літрів) щоб визначити окислювальну здатність аераційної системи з багаторазовим усередненням повітряної фази по глибині аеротенка (рис. 1). Окислювальна здатність визначалася за стандартною методикою [6] аеруванням рідини з якої максимально видалили кисень. Витрата повітря змінювалася в межах 0,5–3 м³/годину. В таблиці 2 наведені результати однієї з числених серій експериментів, з яких випливає, що наявність в аераційній системі кожної наступної «полки-

сітки» під якою стається масова коалесценція пухирців і коли утворюється суцільна газова фаза, то це на кожному етапі призводить до підвищення окислювальної здатності.

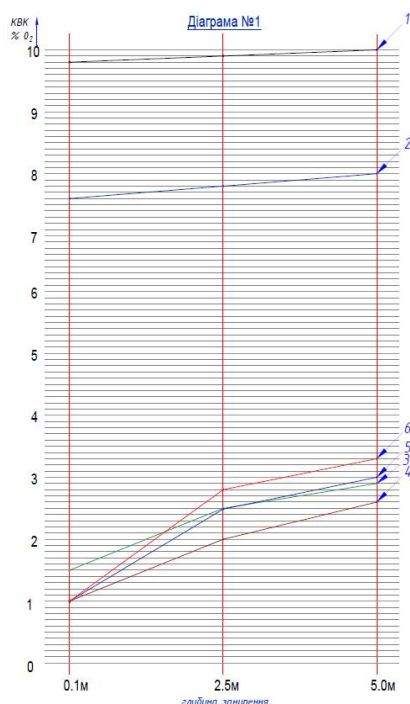


Рисунок 1 – Вплив глибини занурення аераторів

Таблиця 2 – Результати визначення окислювальної здатності аераційної системи з багаторазовим усередненням та диспергацією повітря. (глибина 1 метр, витрата повітря 0,8 м³/годину)

№ п/п	Система аерації (чередування етапів диспергації)	Окислювальна здатність кг O ₂ / м ³ за годину
1	Дрибнопухирцева аерація (ДПА)	4,7
2	ДПА + ковпак з крупно пористою сіткою (КПС)	5,5
3	ДПА + ковпак КПС + ковпак ДПА	7,0
4	ДПА+ковпакКПС+ковпакДПА+ковпак КПС	7,9
5	ДПА+ три ковпака КПС	7,1

Обговорення результатів. Основна гіпотеза, яка була висловлена на початку статті, полягала в тому, що використання сіток на різних рівнях аеротенка призводить до збільшення розчиненого кисню в рідині. Справа в тому, повітря містить тільки 21 % O₂, а це значить, що парціальний тиск [9] може бути оцінений наступним чином:

$$P_{O_2} = X_{O_2} P_{atm} = (0.21)(1atm) = 0.21atm ,$$

де P_{O_2} – парціальний тиск кисню; X_{O_2} – молярна концентрація кисню; P_{atm} – атмосферний тиск.

Застосовуючи закон Генрі [10] ми можемо розрахувати концентрацію газу (O_2), який може бути розчинений в рідкій фазі при даній температурі:

$$C_{eq}^{O_2} = \frac{P_{O_2}}{H_{O_2}} = \frac{0.21atm}{\left(1.08 \frac{atmL}{mmol}\right)} = 0.19 \frac{mmol}{L_{H_2O}},$$

де C_{eq} – градієнт концентрацій O_2 .

Таким чином, якщо:

1. $C_{eq} > C$ – кисень «прямує» в рідку фазу;
2. $C_{eq} < C$ – умова, за якою створюються пухирці;
3. $C_{eq} = C$ – умова рівноваги.

Для досягнення умови рівноваги ми і використовували сітку, яка призводить до того, що градієнт концентрації кисню стає рівним нулю, а отже, максимальна кількість кисню розчиняється по всій глибині рідини, що аерується.

Таким чином, гранична розчинність кисню в 1 л. води складає 0.19 ммоль. Весь інший кисень буде формуватися в бульбашки і спливати на поверхню. При цьому, нижні шари води будуть збагачені киснем більше ніж верхні. Для рівномірного розподілу кисню по всій рідині можна використовувати механічне перемішування, або ж створити зонування по вертикалі, яке призведе до створення нульового градієнта концентрації кисню і відповідно до рівномірного розподілу O_2 . Застосовуючи принцип Ле Шательє [11,12] ми можемо передбачити даний градієнт використовуючи співвідношення:

$$OTR = K_L \cdot a \cdot (C_{eq} - C),$$

де OTR – швидкість переносу кисню; K_L – коефіцієнт спротиву рідини до переносу газу в рідку фазу; a – відношення площини поверхні газової фази до об'єму рідкої фази; C_{eq} – градієнт концентрацій O_2 .

Висновки

1. Гіпотеза, яка була висловлена, про створення рівноважних умов розчинення кисню в аеротенках за рахунок сітчастих диспергаторів була підтверджена експериментально і отримала теоретичне обґрунтування.

2. Була запропонована методика, яка дозволяє оптимізувати енергоспоживання при використанні диспергатора на різних рівнях аеротенків.

3. Розроблено принципову схему диспергатора, яка може бути використана для вертикальних аераторів.

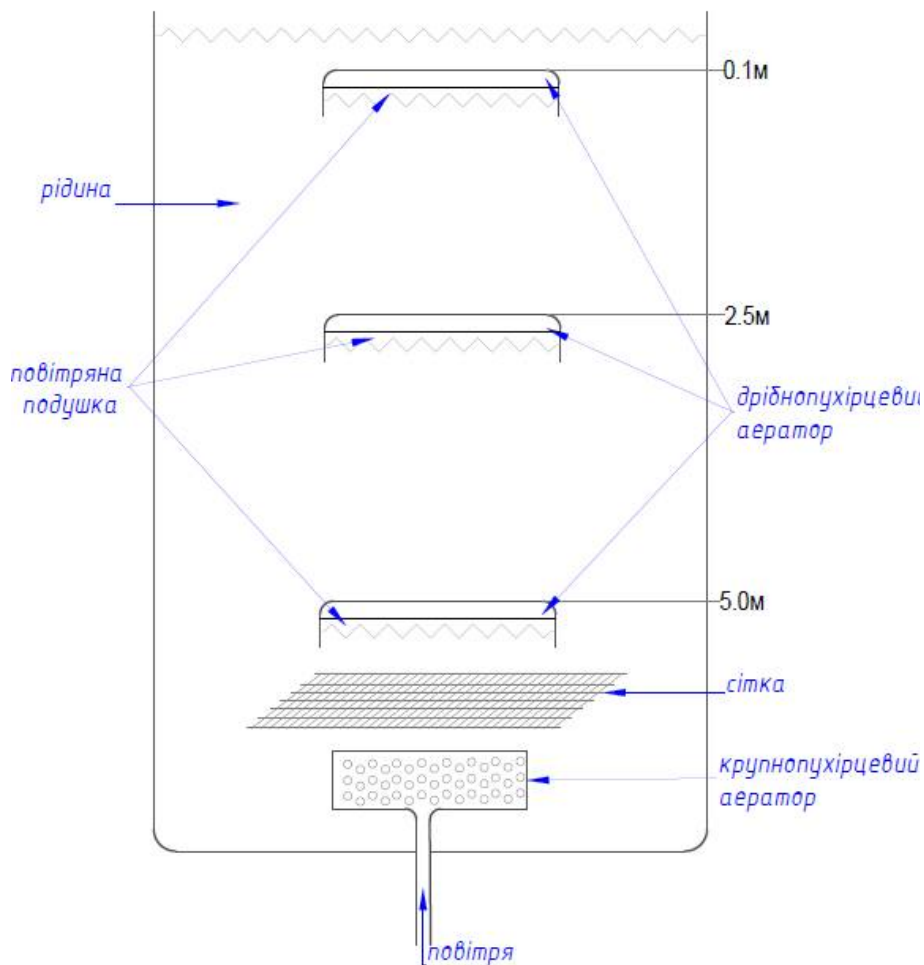


Рисунок 2 – Схема експерименту по визначенню інтенсивності пневматичної аерації від глибини занурення та типу аератора

Література

1. В.О. Бойко «Державне регулювання запровадження програм енергоефективності в Україні.» (2020).
2. Р.З. Подолець Доповідь ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України " за 2013 рік, "Проблеми та перспективи створення сприятливого клімату для підвищення енергоефективності та енергозбереження в Україні".
3. А.Н. Григорьева Оценка интенсивности массообмена и затрат энергии при пневмомеханической аэрации сточных вод // Передовые технологии в системах водоотведения населенных мест. – 2020. – С. 56–60.
4. T. Höhne, T. Mamedov CFD Simulation of Aeration and Mixing Processes in a Full-Scale Oxidation Ditch // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 7. – С. 1633.
5. Q. Zhang et al. (2014). Bioreactor consisting of pressurized aeration and dissolved air flotation for domestic wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 138, 186–190.
6. F. Lefevre et al. Method for regulating aeration during waste water biological treatment : пат. 6527956США. – 2003.

7. S.V. Panno et al. Chemical and Bacterial Quality of Aeration-Type Waste Water Treatment System Discharge // *Groundwater Monitoring & Remediation*. – 2007. – Т. 27. – №. 2. – С. 71–76.
8. П.Д. Викулин, А.О. Фролова. "Факторы, влияющие на эффективность окислительных процессов в аэротенке." *Вестник МГСУ* 8 (2011).
9. L. Pauling, R.E. Wood, J.H. Sturdivant An Instrument for Determining the Partial Pressure of Oxygen in a Gas1 // *Journal of the American Chemical Society*. – 1946. – Т. 68. – №. 5. – С. 795–798.
10. R. Sander Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015. – Т. 15. – №. 8. – С. 4399–4981.
11. A. Maul "Rethinking traditional methods of survey validation." *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives* 15.2 (2017): 51–69.
12. Rhemtulla, et al. "Worse than measurement error: Consequences of inappropriate latent variable measurement models." *Psychological Methods* 25.1 (2020): 30.

Bibliography (transliterated)

1. V.O. Bojko «Derzhavne reguluvannya zaprovadzhennya programm energoefektivnosti v Ukraini.» (2020).
2. R.Z. Podolec' Dopovid' DU "Institut ekonomiki ta prognozuvannya NAN Ukraini" za 2013 rik, "Problemi ta perspektivi stvorennya spriyatlivogo klimatu dlya pidvishchennya energoefektivnosti ta energozberezhennya v Ukraini".
3. A.N. Grigor'eva Ocenka intensivnosti massoobmena i zatrat energii pri pnevmomekhanicheskoy aeracii stochnyh vod // *Peredovye tekhnologii v sistemah vodootvedeniya naseleennyh mest.* – 2020. – P. 56–60.
4. T. Höhne, T. Mamedov CFD Simulation of Aeration and Mixing Processes in a Full-Scale Oxidation Ditch // *Energies.* – 2020. – Т. 13. – №. 7. – P. 1633.
5. Q. Zhang et al. (2014). Bioreactor consisting of pressurized aeration and dissolved air flotation for domestic wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 138, 186–190.
6. F. Lefevre et al. Method for regulating aeration during waste water biological treatment : pat. 6527956SSHA. – 2003.
7. S.V. Panno et al. Chemical and Bacterial Quality of Aeration - Type Waste Water Treatment System Discharge // *Groundwater Monitoring & Remediation*. – 2007. – Т. 27. – №. 2. – P. 71–76.
8. P.D. Vikulin, A.O. Frolova. "Faktory, vliyayushchie na effektivnost' okislitel'nyh processov v aerotenke." *Vestnik MGSU* 8 (2011).
9. L. Pauling, R.E. Wood, J.H. Sturdivant An Instrument for Determining the Partial Pressure of Oxygen in a Gas1 // *Journal of the American Chemical Society*. – 1946. – Т. 68. – №. 5. – P. 795–798.
10. R. Sander Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015. – Т. 15. – №. 8. – P. 4399–4981.
11. A. Maul "Rethinking traditional methods of survey validation." *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives* 15.2 (2017): 51–69.
12. Rhemtulla, et al. "Worse than measurement error: Consequences of inappropriate latent variable measurement models." *Psychological Methods* 25.1 (2020): 30.

УДК: 602

Миць М.Г., Білошенко К.С., Божков А.І.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ АЕРАЦІЇ ПІД ЧАС БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД

Розглянуто принцип дрібнопухирцевої аерації. Експериментально доведено переваги дрібнопухирцевих аераторів перед крупнопухирцевими незалежно від глибини занурення. Вказано, що удосконалення аераційного устаткування може бути зроблено завдяки використанню мілкодисперсної сітки, що встановлюється на різній глибині аеротенку. Вказані гіпотези знайшли підтвердження у експериментах на модельному устаткуванні аеротенка. Теоретичне обґрунтування експериментальних даних надано з урахуванням закону Генрі і принципу Ле Шательє. Вказана методика надає можливість в більш економічному використанні енергоресурсу та інтенсифікує аераційний процес. Метою даної роботи є експериментальна апробація та встановлення найбільш ефективного методу аерації, вдосконалення конструкції аераторів, розробка техніки, яка зменшить енерговитрати процесу аерації стічних вод. Це актуально, тому що сьогодні наша країна має одну з найбільш енергоємних економік Європи. Висловлена гіпотеза про створення рівноважних умов для розчинення кисню в аераційних резервуарах за допомогою сігчастих диспергаторів, була підтверджена експериментально і отримала теоретичне обґрунтування. Запропоновано методику, яка дозволяє оптимізувати споживання енергії при використанні диспергатора на різних рівнях в аеротенках. Розроблена принципова схема диспергатора, який можна використовувати для вертикальних аераторів. Оскільки вертикальне розташування аераторів має значні експлуатаційні та технологічні переваги перед аераційними системами, які зараз експлуатуються на більшості очисних споруд, бо вони вмонтовані в донну частину аеротенків, і щоб виконувати ремонтні або профілактичні роботи, обслуговуючий персонал повинен повністю виводити з експлуатації та зневоднити аеротенк. Також, це дає додаткову можливість, щоб заощадити кошти, при проектуванні та будівництві нових аеротенків, тому що капітальні затрати на вертикальну установку аераторів значно менше ніж донне розташування.

Ключові слова: очистка, стічні води, пристрій, коефіцієнт використання кисню (КВК).

Миць Н.Г., Белошенко К.С., Божков А.И.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ АЭРАЦИИ ВО ВРЕМЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Рассмотрен принцип мелкопузырчатой аэрации. Экспериментально доказано преимущество мелкопузырчатых аэраторов перед крупнопузырьчатыми независимо от глубины погружения. Указано, что усовершенствование аэрационного оборудования может быть сделано благодаря использованию мелкодисперсной сетки, которая устанавливается на разной глубине аеротенка. Указанные гипотезы нашли подтверждение в экспериментах на модельном оборудовании аеротенка. Теоретическое обоснование экспериментальных данных предоставлено с учетом закона Генри и принципа Ле Шателье. Указанная методика позволяет более экономично использовать энергоресурс и интенсифицирует аэрационный процесс. Целью данной работы является экспериментальная апробация и установление наиболее эффективного метода аэрации, совершенство-

вание конструкции аэраторов, разработка техники, которая уменьшит энергозатраты процесса аэрации сточных вод. Это актуально, поскольку сегодня наша страна имеет одну из самых энергоемких экономик Европы. Высказанная гипотеза о создании равновесных условий для растворения кислорода в аэрационных резервуарах с помощью сетчатых диспергаторов, была подтверждена экспериментально и получила теоретическое обоснование. Предложена методика, которая позволяет оптимизировать потребление энергии при использовании диспергатора на разных уровнях в аэротенках. Разработана принципиальная схема диспергатора, который можно использовать для вертикальных аэраторов. Поскольку вертикальное расположение аэраторов имеет значительные эксплуатационные и технологические преимущества перед аэрационными системами, которые сейчас эксплуатируются на большинстве очистных сооружений, т.к. что они встроены в донную часть аэротенков и, чтобы выполнять ремонтные или профилактические работы, обслуживающий персонал должен полностью выводить из эксплуатации и обезводить аэротенк. Также, это дает дополнительную возможность, чтобы сэкономить средства, при проектировании и строительстве новых аэротенков, так как капитальные затраты на вертикальную установку аэраторов значительно меньше, чем донное расположение.

Ключевые слова: очистка, сточные воды, устройство, коэффициент использования кислорода (КИК)

Mits N., Beloshenko K., Bozhkov A.

INTENSIFICATION OF AERATION DURING BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

The principle of fine bubble aeration is considered. The advantage of small-bubble aerators over large-bubble aerators has been experimentally proven, regardless of the immersion depth. It is indicated that the improvement of the aeration equipment can be done through the use of a fine mesh, which is installed at different depths of the aerotank. These hypotheses were confirmed in experiments on the model equipment of the aerotank. The theoretical substantiation of the experimental data is provided taking into account Henry's law and Le Chatelier's principle. This technique allows for more economical use of energy resources and intensifies the aeration process. The purpose of this work is to experimentally test and establish the most effective aeration method, improve the design of aerators, and develop technology that will reduce the energy consumption of the wastewater aeration process. This is relevant because today our country has one of the most energy-intensive economies in Europe. The stated hypothesis about the creation of equilibrium conditions for the dissolution of oxygen in aeration tanks using mesh dispersers was experimentally confirmed and received theoretical justification. A technique is proposed that allows you to optimize energy consumption when using a dispersant at different levels in aeration tanks. A schematic diagram of a disperser has been developed, which can be used for vertical aerators. Since the vertical arrangement of aerators has significant operational and technological advantages over aeration systems that are now used at most treatment facilities, because that they are built into the bottom of the aeration tanks and, in order to carry out repair or maintenance work, the maintenance personnel must completely decommission and dehydrate the aeration tank. Also, this provides an additional opportunity to save money when designing and building new aeration tanks, since the capital costs for vertical installation of the aerators are much less than the bottom location.

Keywords: purification, waste water, device, oxygen utilization factor (KIK)