

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2075-3810-2020-44-02>

УДК 577.359

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РОБОТИ АЛГОРИТМУ
ПЕРІОДИЧНОЇ АЕРАЦІЇ

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

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022,
Україна**e-mail: nmits@karazin.ua*

Надійшла до редакції 19 листопада 2020 р.

Прийнята 25 грудня 2020 р.

Актуальність. Питанню періодичної аерації, яка може використовуватись як інструмент в процесі біологічної очистки стічних вод, завжди приділялося незаслужено мало уваги. Оскільки оптимізація всіх технологічних процесів, з точки зору продуктивності та енергоспоживання, це вимога часу, тому, на нашу думку, більш глибоке вивчення і дослідження фізичних та біологічних процесів, які впливають на метаболізм мікроорганізмів під час періодичної аерації, є дуже важливим.

Метою роботи було: 1) визначення умов стабільного стану біоценозу мікроорганізмів під час застосування режиму короткоциклової періодичної аерації; 2) складання математичної моделі аераційної системи, яка пов'язує приріст біомаси з концентрацією кисню; 3) визначення мінімально граничних концентрацій кисню як умов стабільності системи.

Матеріали і методи. Аераційна система змодельована за допомогою системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку розмноження мікроорганізмів з урахуванням подачі кисню аераційною системою для забезпечення метаболізму мікроорганізмів. Експериментальні дослідження проводилися в штучно виготовленому лабораторному аеротенку (0,7 м × 0,7 м × 1,2 м, ємністю 500 л).

Результати. Рішення системи диференціальних рівнянь дало умови стабільності системи, тобто граничні концентрації кисню на літр рідини. З урахуванням умов стабільності було отримане рівняння, що дозволяє визначити пороговий рівень концентрації кисню, при якому необхідно закінчувати період аерації. За допомогою даних, які були одержані в результаті лабораторних дослідів, стало можливим чисельне визначення коефіцієнта остаточного вмісту кисню γ , з використанням якого можна визначити граничну концентрацію кисню.

Висновки. З систем диференціальних рівнянь, що складається з рівняння розмноження мікроорганізмів за логістичною моделлю та рівняння, яке описує динаміку концентрації кисню у рідині аеротенку, знайдено умови, за яких система є стабільною. З умов стабільності впливає рівняння, що задає умову відключення подачі кисню до системи аерування в алгоритмі періодичної аерації. Оптимальна ступінь очищення і загальний час аерації в експериментах свідчать про те, що інтервал концентрацій O_2 у відпрацьованих газах, при якому слід закінчувати період аерації, можна визначити за цим рівнянням, приймаючи в ньому чисельне значення коефіцієнта γ рівним 0,01–0,02.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікроорганізми; метаболізм; алгоритм періодичної аерації; пороговий вміст кисню; остаточний вміст кисню; біоценоз; гранична концентрація мікроорганізмів.

STUDY OF STABILITY OF PERIODIC AERATION ALGORITHM

N. G. Mits, K. S. Beloshenko, A. I. Bozhkov

*Department of molecular biology and biotechnology, V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq.,
Kharkiv, 61022, Ukraine*

Background: The issue of periodic aeration, which can be used as a tool in the process of biological wastewater treatment, has always received undeservedly little attention. Since the optimization of all technological processes in terms of productivity and energy consumption is a matter of time, so, in our opinion, a deeper study and research of physical and biological processes that affect the metabolism of microorganisms during periodic aeration is very important.

Objectives of the work are *i)* determination of conditions of stable state of biocenosis of microorganisms during application of short-cycle periodic aeration regime, *ii)* drawing up a mathematical model of the aeration system that links the increase in biomass depending on the oxygen concentration, *iii)* determination of minimum limit concentrations of oxygen and microorganisms as conditions for system stability.

Materials and Methods: The aeration system is modeled using a system of differential equations describing the dynamics of reproduction of microorganisms taking into account the supply of oxygen by the aeration system to ensure the metabolism of microorganisms. Experimental studies were carried out in an artificially made laboratory aeration tank (0.7 m × 0.7 m × 1.2 m, with a volume of 500 liters).

Results: The solution of the system of differential equations gave the conditions for the stability of the system, i.e. the limiting concentrations of microorganisms and oxygen per liter of liquid. Taking into account the stability conditions, an equation was derived to determine the threshold level of oxygen concentration at which it is necessary to end the aeration period. With the help of data obtained as a result of laboratory experiments, it became possible to numerically determine the coefficient of residual oxygen content γ , using which it is possible to determine the limiting oxygen concentration.

Conclusions: From the systems of differential equations, which consist of the equation of reproduction of microorganisms according to the logistic model and the equation that describes the dynamics of oxygen concentration in the aeration tank liquid, the conditions under which the system has stability are found. From the conditions of stability the equation that sets the condition for shutting off the supply of oxygen to the aeration system in the algorithm of periodic aeration is followed. The optimal degree of purification and the total aeration time in the experiments testify that the interval of concentrations of O₂ in the exhaust gases, at which the aeration period should be end, can be determined by this equation, taking the numerical value of the coefficient γ equal to 0.01–0.02.

KEY WORDS: microorganisms; metabolism; periodic aeration algorithm; threshold oxygen content; final oxygen content; biocenosis; maximum concentration of microorganisms.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АЭРАЦИИ

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

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Вопросу периодической аэрации, которая может использоваться как инструмент в процессе биологической очистки сточных вод, всегда уделялось незаслуженно мало внимания. Поскольку оптимизация всех технологических процессов, с точки зрения производительности и энергопотребления, это требование времени, поэтому, по нашему мнению, более глубокое изучение и исследование физических и биологических процессов, которые влияют на метаболизм микроорганизмов во время периодической аэрации, является очень важным.

Цель работы было: 1) определение условий стабильного состояния биоценоза микроорганизмов при применении режима короткоциклового периодической аэрации, 2) составление математической модели аэрационной системы, которая связывает прирост биомассы с концентрацией кислорода, 3) определение минимально предельных концентраций кислорода и микроорганизмов как условий стабильности системы.

Материалы и методы. Аэрационная система смоделирована с помощью системы дифференциальных уравнений, которые описывают динамику размножения микроорганизмов с учетом режима подачи кислорода аэрационной системой для обеспечения метаболизма микроорганизмов. Экспериментальные исследования проводились в искусственно изготовленном лабораторном аэротенке (0,7 м × 0,7 м × 1,2 м, объемом 500 л).

Результаты. Решение системы дифференциальных уравнений дало условия стабильности системы, то есть предельные концентрации кислорода на литр жидкости. С учетом условий стабильности было выведено уравнение, позволяющее определить пороговый уровень концентрации кислорода, при котором необходимо заканчивать период аэрации. С помощью данных, которые были получены в результате лабораторных опытов, стало возможным численное определение коэффициента остаточного содержания кислорода γ , с использованием которого можно определять предельную концентрацию кислорода.

Выводы. Из систем дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнения размножения микроорганизмов в соответствии с логистической моделью и уравнения, описывающего динамику концентрации кислорода в жидкости аэротенка, найдены условия, при которых система является стабильной. Из условий стабильности следует уравнение, которое задает условие отключения подачи кислорода в систему аэрирования в алгоритме периодической аэрации. Оптимальная

степень очистки и общее время аэрации в экспериментах свидетельствуют о том, что интервал концентраций O_2 в отработанных газах, при котором следует заканчивать период аэрации, можно определять по этому уравнению, принимая в нем численное значение коэффициента γ , равным 0,01–0,02.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроорганизмы; метаболизм; алгоритм периодической аэрации; пороговое содержание кислорода; остаточное содержание кислорода; биоценоз; граничная концентрация микроорганизмов.

Більшість людей, що живуть в розвинених країнах, вважають за звичайне, що їх вода безпечна для пиття, і відходи їх життєдіяльності транспортуються для належної утилізації, а забруднювачі, шкідливі або безпечні, не будуть накопичуватися в навколишньому середовищі [1]. Ми найчастіше не враховуємо те значення, яке мікроорганізми та віруси відіграють в цих важливих аспектах сучасного життя [2]. Мікроорганізми — це суттєва ланка процесу очищення води, відходів і забрудненого навколишнього середовища [3]. Ми маємо зиск з того факту, що мікроорганізми є останніми переробниками, що грають важливу роль в утилізації наших відходів, але патогенні мікроорганізми і віруси повинні бути видалені зі стічних вод до їх скидання в поверхневі водойми і видалені з води перш ніж вона буде використовуватись для вживання людиною [4–6].

Стічні води складаються з усіх речовин, які ми утилізуємо в своєму повсякденному житті, а також до них додаються промислові стоки підприємств і ливневі стоки міської каналізації [7–11]. Все це потрапляє на станції очисних споруд. Найбільш очевидна причина, по якій стічні води необхідно очищати перед скиданням в поверхневі водойми, полягає в тому, що патогенні мікроби можуть передаватися з фекаліями, що може викликати масові шлунково-кишкові захворювання і гепатит [12–14].

Аналогічним чином, якщо морські прибережні води забруднюються неочищеними стічними водами, споживання морепродуктів, які там виловлюються, може привести до захворювання [15–16]. Риба і моллюски є природними фільтрами і концентрують в собі мікроби з середовища, в якому вони живуть [17–18]. Проблема, яку одразу можна не помітити — це вплив високого вмісту забруднень у стічних водах на воду поверхневих водойм [19]. Забруднення є живильним середовищем для мікроорганізмів, що мешкають у воді. Коли будь-яка багата поживними продуктами речовина додається у водне середовище, мікроорганізми швидко використовують ці сполуки як джерела енергії, використовуючи метаболічні шляхи, такі як гліколіз і цикл Кребса або трикарбонових кислот [20]. В результаті аеробні мікроорганізми споживають доступний O_2 в воді, виснажуючи середовище проживання аборигенних організмів, використовуючи його в якості кінцевого акцептора електронів. Кількість розчиненого O_2 в поверхневих водах обмежена і його можна легко виснажити під час біохімічного розщеплення забруднень (поживних речовин). Аборигенні мешканці поверхневих вод гинуть тому, що їм не вистачає O_2 для дихання. Таким чином, ефективна очистка стічних вод повинна істотно знизити рівень органічних сполук на додаток до усунення патогенів, токсичних матеріалів та інших забруднювачів.

Важливою метою очищення стічних вод є зменшення їх впливу на навколишнє середовище, яке віддзеркалюється в попиті на біологічне споживання кисню (БПК), — кількості O_2 , необхідного для біологічного розкладання органічних речовин в даному зразку [21]. Рівень БПК пропорційний кількості органічного матеріалу в зразку, який розкладається мікроорганізмами. Для визначення БПК вимірюється рівень кисню в добре аерованій (насиченій киснем) пробі тестової води, що містить мікроорганізми [22]. Потім зразок інкубують в закритому контейнері в темряві при стандартних умовах: часу і температурі (зазвичай 5 днів при $20^\circ C$). Потім знову визначається рівень O_2 . Різниця між розчиненим O_2 на початку тесту і в кінці відображає БПК зразка. У

багатьох випадках зразок необхідно розбавити, щоб точно визначити БПК. Високі значення БПК вказують на те, що в тестовій воді присутня велика кількість забруднень, які розкладаються, що призвело до використання відповідно великої кількості O_2 під час біологічного розкладання забруднень [23]. БПК неочищених стічних вод становить приблизно від 300 до 400 мг/л, що може легко виснажити розчинений O_2 в приймаючій воді [24]. Вміст розчиненого кисню в поверхневих водоймах зазвичай становить від 5 до 10 мг/л [25]. Методи, які застосовують для зниження БПК стічних вод, використовують контрольоване середовище, яке прискорює природні процеси [26].

Аеробна обробка дозволяє мікроорганізмам окислювати органічні сполуки в стічних водах за рахунок кисню, який подається зовні (штучною аераційною системою), з утворенням діоксиду вуглецю і різних інших неорганічних сполук. Процеси відбуваються швидко, але методи відносно коштовні, тому що вони повинні бути спроектовані так, щоб підтримувати достатній рівень O_2 .

Таким чином, метою даної роботи є розробка стабільного алгоритму короткоциклової періодичної аерації, що призводить до суттєвого збереження енергоресурсу та активує процес очищення стічних вод.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Аераційну систему можна змоделювати, використовуючи систему диференціальних рівнянь, що описують динаміку розмноження мікроорганізмів з урахуванням подачі кисню аераційною системою для забезпечення метаболізму.

В проведеній серії дослідів крім придатності даного рівняння для визначення параметра регулювання тривалості періоду аерації необхідно було також встановити чисельне значення коефіцієнта остаточного вмісту кисню γ . Результати дослідів отримували приймаючи коефіцієнт використання кисню (КВК) $\gamma=10\%$. Початок періоду аерації у всіх дослідах відповідав концентрації кисню в рідині, яка дорівнювала 0,1 мг/л.

Експериментальні дослідження проводилися в штучно виготовленому лабораторному аеротенку (0,7 м \times 0,7 м \times 1,2 м, ємність 500 л). Відбір проб відпрацьованих газів проводився за допомогою воронкоподібного відбірника (за зразком перевернутої воронки) безпосередньо над поверхнею при схлопуванні бульбашок. Аерація здійснювалася дрібнопухирцевим аератором. Аеротенк заповнили рідиною, яка містить в собі 250–650 мг/дм³ біс-фенола А. Очищення фенольної рідини здійснювалася за допомогою активного мулу, який був адаптований до високої концентрації фенолів. Сигнали про початок та закінчення періоду аерації надходили від датчиків, які вимірюють концентрацію кисню в рідині та «відпрацьованому» повітрі, приладу AR8010.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Таким чином, проведені дослідження показали, що запропонований спосіб регулювання тривалості періодів аерації за концентрацією кисню в рідині і відпрацьованих газах дозволяє оптимізувати кисневий режим в аеротенках в ході очищення і підвищити інтенсивність процесу аерації.

Припустимо, що динаміка розмноження мікроорганізмів в аеротенках, описується логістичною моделлю Ферхюльста [27], а концентрація кисню залежить від подачі кисню в рідину і споживання кисню мікроорганізмами в метаболічних процесах. Тоді система рівнянь матиме вигляд [28–30]:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= OTR - OUR = k_L a (C_{eq} - C) - q_{O_2} N \\ \frac{dN}{dt} &= k \left(1 - \frac{N}{M}\right) N \end{aligned} \quad (1)$$

де

OTR — швидкість переносу кисню,

OUR — швидкість вживання кисню біомасою,

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 ,

C — концентрація O_2 ,

q_{O_2} — коефіцієнт споживання кисню мікроорганізмами,

N — концентрація мікроорганізмів,

k — коефіцієнт приросту мікроорганізмів,

M — гранична концентрація мікроорганізмів у середовищі.

Для знаходження стабільних станів ми повинні вирішити наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} OTR - OUR &= k_L a (C_{eq} - C) - q_{O_2} N = 0 \\ k \left(1 - \frac{N}{M}\right) N &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Очевидно, що існує дві точки стабільності $(C_{eq}; 0)$ і $(C_{eq} - \frac{q_{O_2}}{k_L a} M; M)$ у сенсі, який був наданий Ляпуновим [27]. Перша точка є тривіальною. Друга ж дає нам розуміння граничної концентрації кисню в разі граничної концентрації мікроорганізмів на літр рідини.

В цьому випадку, нам необхідно подавати в систему таку концентрацію кисню, яка задовольнить умови стабільності системи.

Однак, встановити точну рівновагу в системі з технічних міркувань досить складно. Іншими словами, при періодичній аерації найбільш складним є визначення умов для формування команди на відключення періоду аерації, тому що на значення концентрації кисню в відпрацьованих газах впливає коливання змісту O_2 у вхідному газі.

З урахуванням цього умова стабільності була переписана у дискретне рівняння, що дозволяє визначати інтервал концентрацій, при якому необхідно закінчувати період аерації:

$$X_n = X_{n-1} \left(1 - \frac{y}{100}\right) + \gamma X_{n-1}, \quad (3)$$

де

X_n — концентрація кисню в повітрі, що відходить, %,

X_{n-1} — концентрація кисню в повітрі, що подається на аерацію, %,

y — коефіцієнт використання кисню (КВК) конкретної аераційної системи, %,

γ — коефіцієнт, який задає залишкову кількість кисню на початку нового циклу аерації.

В ході експериментальних досліджень було встановлено, що в періоди відключення аерації в аеротенках зниження концентрації розчиненого O_2 спостерігалось як в придонній зоні, так і в приповерхневій зоні аеротенку. На нашу думку, це пояснюється високою сорбційною здатністю (в тому числі і до кисню) активного мулу, а також особливостями його седиментаційних властивостей.

Аналіз даних, наведених в таблиці 1, свідчить про те, що в досліді № 1 при мінімальному часу аерації не досягнута необхідна ступінь очищення. У той же час при хорошій ступені очищення в досліді № 4–6 загальний час аерації становив більше 50% від загальної тривалості очищення.

Оптимальна ступінь очищення і загальний час аерації в досліді № 2–3 свідчать, про те, що інтервал концентрацій O_2 в відпрацьованих газах, при якому слід закінчувати період аерації, можна визначати за рівнянням (3), приймаючи чисельне значення коефіцієнта γ , рівним 0,01–0,02. Це значення дає відповідь на питання за яких умов концентрація мікроорганізмів буде мати значення M — граничну концентрацію мікроорганізмів у середовищі аеротенку.

Таблиця 1. Застосування дискретного рівняння щодо визначення інтервалів концентрацій, які є оптимальними.

№ досліду	Концентрація кисню в відпрацьованому повітрі, при якому закінчували період аерації, %	Значення коефіцієнта γ при X_{n-1}	Загальний час аерації, години	Залишкова концентрація фенолів в очищеній воді, мг/л
1	$18,0 \pm 0,1$	$0,00 \pm 0,005$	$1,6 \pm 0,05$	$86 \pm 0,05$
2	$18,2 \pm 0,1$	$0,02 \pm 0,005$	$1,8 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,025$
3	$18,4 \pm 0,1$	$0,02 \pm 0,005$	$1,8 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,025$
4	$18,6 \pm 0,1$	$0,03 \pm 0,005$	$2,2 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,025$
5	$18,8 \pm 0,1$	$0,04 \pm 0,005$	$2,8 \pm 0,05$	$0,20 \pm 0,025$
6	$19,0 \pm 0,1$	$0,06 \pm 0,005$	$3,4 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,025$

Попередні експерименти підтверджують доцільність регулювання періодів аерації, використовуючи різницю концентрацій O_2 в придонній та приповерхневій зонах, тому що при цьому вимірювання концентрації O_2 проводиться тільки в рідині.

ВИСНОВКИ

Визначено з системи диференціальних рівнянь умову стабільності біологічної системи при періодичній подачі повітря (кисню) в аеротенки.

З експериментальних даних знайдена умова стабільності популяції мікроорганізмів при періодичній аерації, що дає розуміння за яких умов ступень очищення та використання кисню будуть мати максимальні значення.

Мінімальна концентрація кисню, яка необхідна для забезпечення стабільного стану біоценозу мікроорганізмів в рідині, що очищується, складає $0,10 \pm 0,05$ мг/дм³. Концентрація мікроорганізмів не є сталою величиною, а залежить від кількості поживної речовини (забруднень), що міститься в певний час в рідині, яка очищується, що прямо впливає з рівняння Ферхюльста.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють, що фінансових або інших конфліктів інтересів, які могли вплинути на результати, інтерпретацію та висновки дослідження — не існує.

Authors' ORCID ID

Konstantin Beloshenko  <https://orcid.org/0000-0002-9387-3147>Anatoly Bozhkov  <https://orcid.org/0000-0001-8418-5716>

REFERENCES

1. Kosek K, Luczkiewicz A, Fudala-Książek S, Jankowska K, Szopińska M, Svahn O, et al. Implementation of advanced micropollutants removal technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) - Examples and challenges based on selected EU countries. *Environ Sci Policy*. 2020 Oct;112:213–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.011>
2. Zhang D, Ling H, Huang X, Li J, Li W, Yi C, et al. Potential spreading risks and disinfection challenges of medical wastewater by the presence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) viral RNA in septic tanks of Fangcang Hospital. *Sci Total Environ*. 2020 Nov;741:140445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140445>
3. Shen Y, Gao J, Li L. Municipal wastewater treatment via co-immobilized microalgal-bacterial symbiosis: Microorganism growth and nutrients removal. *Bioresour Technol*. 2017 Nov;243:905–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.041>
4. Azyan Rozlan. The effect of ultra violet germicidal to the removal of pathogens in rainwater harvester [Project Paper]. Kuantan, Pahang: UMP; 2018. 32 p. Available from: <https://efind.ump.edu.my/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=90889>
5. Topić Popović N, Kepec S, Kazazić SP, Barišić J, Strunjak-Perović I, Babić S, et al. The impact of treated wastewaters on fish bacterial flora: a public health perspective. *Croatian Journal of Fisheries*. 2019 Sep 1;77(3):133–6. <https://doi.org/10.2478/cjf-2019-0015>
6. Bodzek M, Konieczny K, Rajca M. Membranes in water and wastewater disinfection. *Arch Environ Prot*. 2019;45(1):3–18. <https://doi.org/10.24425/AEP.2019.126419>
7. Schaidler LA, Rodgers KM, Rudel RA. Review of organic wastewater compound concentrations and removal in onsite wastewater treatment systems. *Environ Sci Technol*. 2017 Jul 5;51(13):7304–17. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04778>
8. Rogowska J, Cieszyńska-Semenowicz M, Ratajczyk W, Wolska L. Micropollutants in treated wastewater. *Ambio*. 2020 Feb;49(2):487–503. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01219-5>
9. Widian DR, You S, Yang H, Tsai J, Wang Y. Source apportionment of air pollution and characteristics of volatile organic compounds in a municipal wastewater treatment plant, North Taiwan. *Aerosol Air Qual Res*. 2017;17(11):2878–90. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.09.0317>
10. Zhang Y, Wei C, Yan B. Emission characteristics and associated health risk assessment of volatile organic compounds from a typical coking wastewater treatment plant. *Sci Total Environ*. 2019 Nov;693:133417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.223>
11. De Gisi S, Lofrano G, Grassi M, Notarnicola M. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustain Mater Technol*. 2016 Sep;9:10–40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>
12. Brisebois E, Veillette M, Dion-Dupont V, Lavoie J, Corbeil J, Culley A, et al. Human viral pathogens are pervasive in wastewater treatment center aerosols. *J Environ Sci*. 2018;67:45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.07.015>
13. Matos A, Mesquita J, Gonçalves D, Abreu-Silva J, Luxo C, Nascimento M. First detection and molecular characterization of hepatitis E virus in water from wastewater treatment plants in Portugal. *Ann Agric Environ Med*. 2018 Jun 20;25(2):364–7. <https://doi.org/10.26444/aaem/90497>
14. Beyer S, Szewzyk R, Gnirss R, Johne R, Selinka H. Detection and characterization of hepatitis E virus genotype 3 in wastewater and urban surface waters in Germany. *Food Environ Virol*. 2020 Jun;12(2):137–47. <https://doi.org/10.1007/s12560-020-09424-2>
15. Barboza LGA, Cózar A, Gimenez BCG, Barros TL, Kershaw PJ, Guilhermino L. Chapter 17 – Macroplastics pollution in the marine environment. In: *World seas: an Environmental Evaluation*, Elsevier; 2019, p. 305–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00019-X>
16. Mishra S, Rath Cc, Das AP. Marine microfiber pollution: A review on present status and future challenges. *Marine Pollution Bulletin*. 2019 Mar;140:188–97. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.039>
17. Kazour M, Terki S, Rabhi K, Jemaa S, Khalaf G, Amara R. Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill. *Marine Pollution Bulletin*. 2019 Sep;146:608–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.066>
18. Burket SR, White M, Ramirez AJ, Stanley JK, Banks KE, Waller WT, et al. *Corbicula fluminea* rapidly accumulate pharmaceuticals from an effluent dependent urban stream. *Chemosphere*. 2019 Jun;224:873–83. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.014>

19. Edokpayi JN, Odiyo JO, Olatunde SD. Impact of wastewater on surface water quality in developing countries: a case study of South Africa. In: Hlanganani Tutu, editor. Water quality. IntechOpen; 2017. p. 401–416 . <https://doi.org/10.5772/66561>
20. Li J, Li J, Gao R, Wang M, Yang L, Wang X, et al. A critical review of one-stage anammox processes for treating industrial wastewater: Optimization strategies based on key functional microorganisms. *Bioresource Technology*. 2018 Oct;265:498–505. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.013>
21. Pasternak G, Greenman J, Ieropoulos I. Self-powered, autonomous Biological Oxygen Demand biosensor for online water quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017 Jun;244:815–22. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.019>
22. Hiser LL, Busch AW. An 8-hour biological oxygen demand test using mass culture aeration and cod. *Journal (Water Pollution Control Federation)*. 1964;36(4):505-516 . Hiser, L., & Busch, A. (1964). *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 36(4), 505–516. Available from <http://www.jstor.org/stable/25035054>
23. Jouanneau S, Recoules L, Durand M, Boukabache A, Picot V, Primault Y, et al. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research*. 2014 Feb;49:62–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
24. Hur J, Lee B, Lee T, Park D. Estimation of biological oxygen demand and chemical oxygen demand for combined sewer systems using synchronous fluorescence spectra. *Sensors*. 2010 Mar 24;10(4):2460–71. <https://doi.org/10.3390/s100402460>
25. World Health Organization. (1993). Guidelines for drinking-water quality: volume 1: recommendations, 2nd ed. World Health Organization. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/259956>
26. Oleynik OY, Airapetian TS, Kurganska SM. Evaluation of the performance of aerotanks due to add-on attached biocenosis. *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019 Aug 14;0(4(82)):37–46. <https://doi.org/10.15802/stp2019/175883>
27. Meyers RA, editor. *Encyclopedia of complexity and systems science*. New York: Springer; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3>
28. Verhulst PF, Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Corresp. Math. Phys.* 1838;10:113–126.
29. Garcia-Ochoa F, Gomez E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview. *Biotechnology advances* 27.2 (2009): 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006>
30. Pittoors E, Guo Y, W. H. Van Hulle S. Modeling dissolved oxygen concentration for optimizing aeration systems and reducing oxygen consumption in activated sludge processes: A review. *Chemical Engineering Communications*. 2014 Aug 3;201(8):983–1002. <https://doi.org/10.1080/00986445.2014.883974>