

АНОТАЦІЯ

Лемеш Максим Вікторович «Удосконалення методів розрахунку споруд біологічної очистки» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена розробці методів оцінки ефективності очистки води в біореакторах – аеротенках. Біологічна очистка стічних вод широко використовується в усіх країнах світу, тому що являє собою ефективний засіб ліквідації органічних забруднень. На етапі проектування споруд біологічної очистки, реконструкції існуючих біореакторів виникає потреба швидко оцінити ефективність роботи споруд для нових умов експлуатації. З часом, конструкції біореакторів, режими їх роботи суттєво ускладнюються. Дуже часто умови експлуатації сучасних біореакторів відрізняються від «типових», коли для розрахунку біореакторів достатньо використання існуючих інженерних методів розрахунку. Інженерні методи не враховують ряд важливих параметрів, що впливають на процес біологічного очищення стічних вод, наприклад, інженерні методики не враховують форму біореактора, присутність рухомих носіїв біоценозу, наявність додаткових конструктивних елементів в споруді, тощо. Тому, інженерні методи не відповідають, в ряді випадків, сучасним вимогам. У зв'язку з цим, розробка сучасних методів комп'ютерного моделювання багатофакторного процесу очистки стічних вод в біологічних реакторах, з метою визначення ефективності їх роботи, – є важливою науковою задачею.

Наукова новизна отриманих результатів:

вперше:

- розроблено метод оцінки ефективності роботи біологічного реактора для очистки стічних вод, що базується на використанні двовимірних моделей гідродинаміки, масопереносу та біологічної очистки, який дозволяє швидко розрахувати ефективність очистки води в споруді з урахуванням її конструктивних особливостей, режиму роботи;

- розроблено метод оцінки ефективності роботи біологічного реактора для очистки стічних вод, що базується на використанні тривимірних моделей гідродинаміки, масопереносу та біологічної очистки, який дозволяє швидко розрахувати ефективність очистки води в споруді з урахуванням її конструктивних особливостей, режиму роботи;

- розроблено метод оцінки ефективності роботи біологічного реактора для очистки стічних вод, що базується на використанні двовимірних моделей гідродинаміки, масопереносу та біологічної очистки, який дозволяє швидко розрахувати ефективність очистки води в споруді з рухомим біоценозом;

удосконалено:

- метод розрахунку біореактора для очистки стічних вод, що базується на використанні нуль-вимірних моделей біологічної очистки стічних вод, який дозволяє, на відміну від існуючих, враховувати зміну з часом витрати та концентрації активного мулу, субстрату, що надходять в біореактор.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені в дисертації методи дозволяють швидко оцінювати ефективність роботи як класичних біореакторів, так і реакторів з додатковими конструктивними елементами, а також реакторів з рухомим біоценозом. Час розрахунку ефективності роботи біологічного реактору за допомогою розроблених методів складає декілька секунд, що є дуже важливим для їх практичного використання при проведенні проектувальних робіт. Розроблені методи розрахунку будуть корисними для оптимізації роботи існуючих біологічних реакторів при змінних режимах роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «Енергосервіс-КР», а також використовуються в навчальному процесі Дніпровського

національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за освітньою програмою «Водопостачання та водовідведення».

Системний аналіз наукових публікацій показав, що в світі найбільш активно використовуються нуль-вимірні математичні моделі для розрахунку реакторів біологічної очистки стічних вод. Але ці моделі не враховують змінну з часом витрати стічних вод, а також зміну з часом концентрації субстрату, що надходить в реактор. Аналіз літературних джерел також показав, що існує дефіцит методів розрахунку біореакторів для очистки стічних вод, що дозволяють розраховувати гідродинаміку та багатовимірні процеси масопереносу в біореакторі. Розрахунок на базі існуючих моделей, що реалізовані в комерційних кодах, триває кілька діб. В Україні відсутні моделі розрахунку біореакторів, що дозволяли б враховувати їх геометричну форму та формування нерівномірного поля концентрації активного мулу та субстрату в реакторі. Тому, актуальною задачею є створення математичних моделей для розрахунку біореакторів з завислим або рухомих біоценозом.

Для експрес розрахунку біореакторів очистки стічних вод запропоновано дві балансові моделі, що дають можливість розраховувати процес біологічного очищення стічних вод з урахуванням зміни з часом витрати стічних вод, що потрапляють в реактор, та вхідної концентрації субстрату, а також з урахуванням зміни з часом витрати активного мулу, що потрапляє в реактор та його концентрації.

З метою врахування впливу гідродинаміки потоку стічних вод в реакторі, а також масопереносу субстрату на ефективність роботи біореактора розроблена двовимірна чисельна модель. Для розрахунку процесу окислення субстрату в даній моделі використовується рівняння першого порядку. Ця модель може бути використована для проведення «пілотних» розрахунків реактору з метою визначення його ефективності. Для моделювання роботи біологічного реактора з урахуванням гідродинаміки потоку стічних вод в реакторі, а також масопереносу субстрату та активного

мулу, побудована інша чисельна модель, в якій розрахунок процесу біологічного очищення стічних вод здійснюється на базі рівнянь Monod. Крім даної моделі також розроблена тривимірна математична модель роботи біологічного реактору, що базується на рівняннях Monod, рівняннях масопереносу для субстрату та активного мулу. Модель дає можливість розраховувати роботу біологічного реактора з урахування нерівномірного поля течії в споруді.

В дисертації також розроблена динамічна чисельна модель для розрахунку процесу біологічної очистки води в реакторах з рухомим біоценозом.

В дисертації приведено опис побудованих чисельних моделей. Основу розроблених чисельних моделей складають кінцево-різницеві схеми. Для чисельного інтегрування двовимірних та тривимірних рівнянь гідродинаміки (рівняння Лапласа для потенціалу швидкості) використовуються різницеві схеми розщеплення. На кожному кроці розщеплення розрахунок невідомої величини потенціалу швидкості здійснюється за явною формулою. Це дозволяє побудувати просту програмну реалізацію чисельної моделі. Основу побудованих чисельних моделей для розрахунку полів концентрації субстрату, активного мулу в біореакторі, а також концентрації рухомих носіїв біоценозу складають різницеві схеми розщеплення. Особливістю цих різницевих схем є те, що визначення невідомого значення концентрації субстрату, активного мулу, концентрації рухомих носіїв біоценозу реалізується за явною схемою. В дисертації наводиться опис розроблених пакетів програм, що реалізують комп'ютерний розрахунок на базі розроблених чисельних моделей. Виконано верифікацію побудованих чисельних моделей.

Для ілюстрації можливостей та робочого діапазону побудованих чисельних моделей, в дисертації представлено рішення комплексу прикладних задач. Усі задачі відносяться до одного з найскладніших класів – клас нестационарних задач біологічної очистки стічних вод. Розглянуті в

дисертації задачі, умовно, можна поділити на чотири групи. Перша група задач – це визначення ефективності роботи біореакторів для очистки стічних вод на базі побудованих камерних чисельних моделей. При проведенні обчислювальних експериментів визначається динаміка процесу біологічної очистки стічних вод при різних режимах експлуатації очисних споруд. Друга група задач – це дослідження ефективності роботи біореакторів на базі розроблених двовимірних чисельних моделей. Розглядаються задачі, в яких визначається ефективність роботи реакторів при наявності в них додаткових елементів, а також додаткового, дотичного вприскування активного мулу в робочий об'єм реактору. Третя група задач – це дослідження ефективності роботи біореакторів, в яких використовуються рухомі носії біоценозу. Дослідження проведені для біореакторів з різними варіантами розташування блоків з рухомими носіями біоценозу всередині споруди. Четверта група задач – це дослідження ефективності роботи біореакторів на базі розроблених тривимірних чисельних моделей. Дослідження проведені для біореакторів з різними варіантами розташування додаткових пластин в споруді. Результати проведених досліджень показують, що розроблені методи розрахунку біореакторів дозволяють на новому якісному та кількісному рівні проводити розрахунки реакторів для біологічної очистки стічних вод.

Ключові слова: очищення води, водокористування, біологічний реактор, чисельне моделювання, модель Monod, рухомі носії біоценозу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Biliaiev M., Lemesh M. Modeling of Biological Wastewater Treatment on the Basis of Quick-Computing Numerical Model. *Наука та прогрес транспорту.* –

2018. – № 1 (73). – С. 15–23. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*)
2. Biliaiev M., Gunko E., Lemesh M. Simulation of Aeration Tank Work. *Collection of Research Papers of National Mining University.*- 2018. - № 53. – С. 230-237.
3. Biliaiev M.M., Kirichenko P.S., Lemesh M.V. Numerical simulation of biological wastewater treatment in aeration tank. *Математичне моделювання.* – 2018. – №1. - С. 28-34.
4. Biliaiev M., Mashykhina P., Lemesh M. Simplified model to simulate the aeration tank work. *Collection of Research Papers of National Mining University.* – 2018. - № 54. - С. 330-336.
5. Biliaiev M., Savina O., Lemesh M., Tsurkan V. Biological waste water treatment in aeration tanks // *Collection of Research Papers of National Mining University.* – 2018. - № 55. - P. 325-333.

Стаття у закордонному науковому періодичному виданні:

6. Біляєв М.М., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кіріченко П.С. Моделювання очистки води в системах «аеротенк - відстійник». *East European Scientific Journal.* – 2019. – Vol 10(50). – P. 10-15.

Публікації у виданнях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В. Информационная система «WASTE-WATERTREATMENT» для оценки эффективности работы очистных сооружений. XI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», 13.12.2017 -14.12.2017, Дніпро, 2017.
8. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Стуликов З.Г. Математическое моделирование биологической очистки сточных вод в аэротенках. *Материалы международной научно-технической конференции*

«Информационные технологии в металлургии и машиностроению», 27-29 березня, 2018. Дніпро, 2018.

9. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Грабар Я.А. Математические модели в задачах очистки сточных вод. *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація систем», 1-2 листопада 2018р. – Дніпро, УДХТУ – С. 37.*

10. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В. Информационная система для анализа работы аэротенков. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», 12-13 грудня, 2018р. – Дніпро, ДНУЗТ – С. 128.*

11. Беляев М.М., Долина Л.Ф., Козачина В.А., Лемеш М.В. Численные модели для расчета гидродинамики и массопереноса в системах очистки воды. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», 11-12 грудня, 2019р. – Дніпро, ДНУЗТ – С. 53.*

12. Лемеш М.В., Козачина В.А., Гончаров В.В., Поляков А.А., Рекунович А.С. Повышение эффективности очистки сточных вод – как инструмент защиты водоемов от загрязнения. *Науковий симпозиум «Тиждень еколога - 2019», 7 -10 жовтня, 2019, Кам'янське, ДДТУ. – С.110 -111с.*

13. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кириченко П.С. Компьютерное моделирование очистки сточных вод. *Матеріали V Міжнародної науково – технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», 6 – 8 листопада 2019, м. Дніпро, с.22.*

14. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кириченко П.С. Математические модели в задачах очистки сточных вод. *Матеріали IX Міжнародної наукової конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», 15 -16 жовтня 2019, Харків, ХНУБА. С. 5.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

15. Лемеш М.В., Біляєв М.М., Татарко Л.Г., Якубовська З.М. Моделювання біологічного очищення стічних вод на базі камерних моделей // *Наука та прогрес транспорту*. – 2020. – № 3 (87). – С. 16–24. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*)

ABSTRACT

Lemesh Maksym Viktorovych. Improvement of methods for calculation of biological treatment facilities. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for PhD degree in specialty 192 – Building and Civil Engineering. – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the development of methods to evaluate the efficiency of wastewater treatment in bioreactor – aeration tank.

Biological wastewater treatment is widely used in all countries of the world, because it is an effective mean of eliminating organic pollutants. At the stage of designing or reconstruction of existing biological treatment facilities (bioreactors), there is a need to quickly assess the efficiency of the facilities for new operating conditions. Over time, the design of bioreactors, their modes of operation have become significantly more complicated. Very often the operating conditions of modern bioreactors differ from the "typical", when, for calculation of bioreactors, the existing engineering methods of calculation cannot be used. Engineering methods do not take into account a number of important parameters that affect the process of biological wastewater treatment in aeration tanks, for example, engineering methods do not take into account the shape of the bioreactor, the presence of mobile carriers with sludge, the presence of additional structural elements in the structure. Therefore, engineering methods do not meet, in some cases, modern requirements. Therefore, the development of modern methods of

computer modeling of the multifactor process of wastewater treatment in biological reactors, in order to determine the efficiency of their work – is an important scientific task.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time:

- developed a method for evaluating the efficiency of a biological reactor for wastewater treatment, based on two-dimensional models of fluid dynamics, mass transfer and biological treatment, which allows quickly to calculate the efficiency of waste water treatment in bioreactor taking into account its design features;

- developed a method for assessing the efficiency of a biological reactor for wastewater treatment, based on three-dimensional models of fluid dynamics, mass transfer and biological treatment, which allows quickly to calculate the efficiency of waste water treatment in bioreactor taking into account its design features;

- developed a method for evaluating the efficiency of a biological reactor for wastewater treatment, based on two-dimensional models of fluid dynamics, mass transfer and biological treatment, which allows quickly to calculate the efficiency of wastewater treatment in a bioreactor with a mobile biocenosis.

Improved:

- method of calculating the bioreactor for wastewater treatment, based on balance models of biological wastewater treatment, which, in contrast to existing ones, takes into account changes over time flow rate and concentration of activated sludge, substrate entering the bioreactor.

The practical significance of the results. The methods developed in the dissertation allow quickly to evaluate the efficiency of both classical bioreactors and reactors with additional structural elements, as well as reactors with mobile biocenosis. The time of calculation of the efficiency of the biological reactor, using the developed methods, is a few seconds, which is very important for their practical use in design work. The developed calculation methods will be useful for optimizing the operation of existing biological reactors under variable operating modes.

The results of the dissertation are implemented at company Energoservice-KR, and are also used in the educational process of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan for students majoring in "Water Supply and Wastewater Treatment".

System analysis of scientific publications has shown that, in the world, the most actively zero-dimensional mathematical models are used for calculation of reactors for biological wastewater treatment. However, these models do not take into account time-varying wastewater flow rates, as well as time-varying concentrations of substrate entering the reactor. Analysis of the literature also showed that there is a shortage of methods for calculating bioreactors for wastewater treatment, which allow to calculate the fluid dynamics and multidimensional mass transfer processes in the bioreactor. The calculation based on existing models implemented in commercial codes takes several days. In Ukraine, there are no models for calculating bioreactors that would take into account their geometric shape and the formation of a non-uniform field of concentration of activated sludge and substrate in the reactor. Therefore, the urgent task is to create mathematical models for the calculation of bioreactors with suspended or mobile biocenosis.

For quick calculation of bioreactors for wastewater treatment, two balance models were developed, which allow to calculate the process of biological wastewater treatment taking into account changes over time flow rate of wastewater entering the reactor and the input concentration of the substrate, as well as changes over time sludge entering the reactor and its concentration.

In order to take into account the influence of fluid dynamics of wastewater flow in the reactor, as well as the mass transfer of the substrate on the efficiency of the bioreactor, two-dimensional numerical model was developed. The first-order equation is used to calculate the oxidation process of the substrate in this model. This model can be used to conduct "pilot" calculations of the reactor to determine its efficiency. To model the operation of the biological reactor taking into account the fluid dynamics of wastewater flow in the reactor, as well as mass transfer of

substrate and activated sludge, another numerical model was built, in which the calculation of biological wastewater treatment is based on Monod equations. In addition to this model, a three-dimensional mathematical model of the biological reactor operation based on Monod equations, mass transfer equations for substrate and activated sludge has been developed. The model allows to calculate the operation of a biological reactor taking into account the nonuniform flow field in the structure.

In dissertation dynamic numerical models for calculating the process of biological water treatment in reactors with moving carriers were developed.

The basis of the developed numerical models are finite-difference schemes. Difference splitting schemes are used for numerical integration of two-dimensional and three-dimensional equations of hydrodynamics (Laplace equation for velocity potential). At each step of splitting, the calculation of the unknown value of the velocity potential is carried out by the method of explicit formula. This allows to build a simple program for implementing a numerical model. The basis of the developed numerical models for calculation of the fields of substrate concentration, activated sludge concentration in bioreactor, as well as the concentration of mobile carriers of the biocenosis difference schemes of splitting were used. The peculiarity of these difference schemes is that the determination of the unknown value of the concentration of the substrate, activated sludge, the concentration of mobile carriers of the biocenosis is realized according to an explicit scheme. The dissertation describes the developed software packages that implement computer calculation on the basis of developed numerical models. Verification of constructed numerical models was performed.

To illustrate the possibilities and working range of developed numerical models, solution of different applied problems is presented. All tasks belong to the most complex class of non-stationary tasks of biological wastewater treatment. The problems considered in the dissertation, can be divided into four groups. The first group of tasks is devoted to determination of the efficiency of bioreactors for wastewater treatment based on the basis of balance numerical models. When

conducting computational experiments, the dynamics of the process of biological wastewater treatment at different modes of operation of treatment facilities has been determined. The second group of tasks is devoted to determination of efficiency of bioreactors on the basis of developed two-dimensional numerical models. Problems which were solved were devoted to determination of efficiency of the reactors with additional elements, and for injection of activated sludge into the working volume of the reactor. The third group of tasks is devoted to determination of the efficiency of bioreactors with mobile carriers with sludge . Studies have been conducted for bioreactors with different options for the location of units with movable carriers of the biocenosis inside reactor. The fourth group of problems is devoted to determination of efficiency of bioreactors based on the basis of developed three-dimensional numerical models. The research was conducted for bioreactors with different options for the location of additional plates in the structure. The results of the conducted researches show that the developed methods of calculation of bioreactors allow to carry out calculations at a new qualitative and quantitative level.

Keywords: water treatment, water use, biological reactor, numerical modeling, Monod model, moving bed biofilm reactor