

АНОТАЦІЯ

Чірков А. О. Удосконалення методів розрахунку кисневого режиму в очисних спорудах водовідведення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено розробці багатофакторних, швидкокорозрахункових CFD (чисельних) моделей, що дають можливість аналізувати та прогнозувати кисневий режим та ефективність біологічного очищення стічних вод в аеротенках.

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз наукових публікацій, присвячених проблемі біологічного очищення стічних вод. Результати аналізу показали, що геометрія аераційної системи в аеротенках є ключовим фактором у забезпеченні гідравлічної ефективності та стабільності біологічних процесів. Робота аераторів є найбільш енерговитратним процесом при біологічному очищенні стічних вод. Тому розробка методів, що дозволяють обґрунтувати раціональне розташування аераторів, є особливо важливою задачею. Проведення лабораторних та експериментальних досліджень для аналізу процесів масопереносу активного мулу, субстрату, розчиненого кисню в аеротенках потребують значного часу, коштовного обладнання, кваліфікованих фахівців для обробки результатів вимірювань. Тому вкрай важливим аспектом в області проєктування систем біологічного очищення стічних вод є розробка методів математичного моделювання. Для практики необхідні математичні моделі, що дають можливість врахувати гідродинаміку в очисних спорудах, тому використання камерних (нуль-вимірних) моделей, одновимірних моделей для розрахунку споруд біологічного очищення стічних вод не є ефективним. Важливим аспектом є розробка математичних моделей, що враховують конфігурацію очисних споруд. Наявність таких математичних моделей дає проєктувальникам інструмент для рішення задач по енергетичної

оптимізації систем аерації, що, як відомо, складають основну частку експлуатаційних витрат. Аналіз літературних джерел показав, що використання комерційних CFD (чисельних) моделей потребує значних ресурсів обчислювальної техніки, багато часу на проведення обчислювальних експериментів та значної кількості вхідних параметрів, що не є зручним для щоденного використання таких моделей на практиці. Тому важливим питанням залишається проблема розробки швидкорозрахункових багатофакторних чисельних моделей для щоденного використання на практиці.

У **другому розділі** дисертації розглянуто комплекс математичних моделей для визначення концентраційних полів активного мулу, субстрату, розчиненого кисню та повітряних бульбашок в аеротенках. Запропонована комплексна двовимірна модель для аналізу біологічного очищення стічних вод в аеротенку; модель дає можливість моделювати процес біологічного очищення стічних вод з урахуванням нерівномірного поля концентрації активного мулу, субстрату, розчиненого кисню в споруді; модель «замикається» рівняннями Monod; особливістю моделі біологічного очищення є розрахунок поширення повітряних бульбашок в аеротенку від аератора та врахування переходу кисню від бульбашки до стічних вод.

Запропоновано комплексну тривимірну модель для аналізу біологічного очищення стічних вод в аеротенку; модель дає можливість моделювати процес біологічного очищення стічних вод з урахуванням нерівномірного поля концентрації активного мулу, субстрату, розчиненого кисню в споруді; модель «замикається» рівняннями Monod; особливістю моделі біологічного очищення є розрахунок поширення повітряних бульбашок в аеротенку від аератора та врахування переходу кисню від бульбашки до стічних вод. Запропоновано математичну модель «техногенного» забруднення аеротенку внаслідок емісії пилу в споруду при роботі аератору.

Для рішення задачі гідродинаміки в аеротенку запропоновано використання двох фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища – моделі потенціального руху та рівнянь Ейлера.

Запропоновано математичну модель для рішення задачі по визначенню раціонального місця розташування аератора в аеротенку. Моделюючим рівнянням є спряжене рівняння масопереносу (теорія Г. Марчука). Розглянуто параметри, що потрібні для практичного використання моделей біологічного очищення стічних вод в аеротенках.

В **третьому розділі** дисертації розглянуто розробку двовимірних CFD (чисельних) моделей для визначення в аеротенку концентраційних полів активного мулу, субстрату, розчиненого кисню, повітряних бульбашок, що виходять з аератора; моделі враховують конвективний перенос в аеротенку, процес дифузії, тобто основні гідродинамічні параметри, що впливають на формування концентраційних полів аеротенку.

Розглянуто побудову тривимірних чисельних моделей для визначення в аеротенку концентраційних полів активного мулу, субстрату, розчиненого кисню, повітряних бульбашок, що виходять з аератора; моделі враховують конвективний перенос в аеротенку, процес дифузії, тобто основні гідродинамічні параметри, що впливають на формування просторових концентраційних полів аеротенку.

Розглянуто побудову тривимірної чисельної моделі для рішення задачі гідродинаміки в аеротенку; розрахунок значення потенціалу швидкості здійснюється на базі явної формули, що допускає просту програмну реалізацію чисельної моделі.

Розглянуто побудову двох двовимірних чисельних моделей для рішення задачі гідродинаміки в аеротенку; перша модель базується на чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості, друга – шляхом чисельного інтегруванні рівнянь Ейлера. Особливістю обох чисельних моделей є використання явних формул для визначення невідомих параметрів. Це дає

можливість здійснити просту програмну реалізацію розроблених чисельних моделей гідродинаміки.

Розглянуто побудову чисельної моделі для рішення багатофакторної задачі по визначенню місця раціонального розташування аератору в аеротенку.

Здійснено програмну реалізацію розроблених чисельних моделей. Створені коди являють собою інструмент розрахунку значення потенціалу швидкості на базі явної формули, що допускає просту програмну реалізацію чисельної моделі. Здійснено верифікацію розроблених чисельних моделей; результати верифікації підтвердили адекватність розроблених моделей.

В **четвертому розділі** дисертації наведені результати комплексу обчислювальних експериментів на базі розроблених 2D та 3D CFD (чисельних) моделей. Наведені результати розрахунку концентраційних полів розчиненого кисню, повітряних бульбашок, активного мулу, субстрату в аеротенках складної геометричної форми, при різній конфігурації розташування аераторів. Представлені результати обчислювального експерименту по визначенню концентраційного поля пилу в аеротенку при «техногенному» забрудненню середовища від аератору. Показано приклад рішення задачі по визначенню раціонального місця розташування аератору в аеротенку шляхом використання розробленої моделі на базі спряженого рівняння.

Ключові слова: обробка стічних вод, біологічні елементи, аеротенк, субстрат, бульбашки повітря, мікрофлора, аерація, якість води, мул, вдув повітря, масоперенос, гідродинаміка, кисневий режим.

ABSTRACT

Chirkov A. O. Improving Methods for Calculating Oxygen Conditions in Wastewater Treatment Plants – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Building Industry and Civil Engineering. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2026.

This dissertation is devoted to the development of multifactorial, fast-computing CFD (numerical) models that enable the analysis and prediction of the aerobic conditions and efficiency of biological wastewater treatment in aeration tanks.

The first chapter of the dissertation analyzes scientific publications devoted to the problem of biological wastewater treatment. The results of the analysis showed that the geometry of the aeration system in aerotanks is a key factor in ensuring hydraulic efficiency and the stability of biological processes. The operation of aerators is the most energy-intensive process in biological wastewater treatment. Therefore, the development of methods to justify the rational arrangement of aerators is a particularly important task. Conducting laboratory and experimental studies to analyze mass transfer processes of activated sludge, substrate, and dissolved oxygen in aerotanks requires significant time, expensive equipment, and qualified specialists to process the measurement results. Therefore, the development of mathematical modeling methods is a crucial aspect of designing biological wastewater treatment systems. For practical applications, mathematical models are needed that allow for the consideration of hydrodynamics within treatment facilities; therefore, the use of chamber (zero-dimensional) models or one-dimensional models for calculating biological wastewater treatment facilities is not effective. An important aspect is the development of mathematical models that account for the configuration of treatment facilities. The availability of such mathematical models provides designers with a tool for solving problems related to the energy optimization of aeration systems, which, as is well known, account for the majority

of operating costs. A review of the literature has shown that the use of commercial CFD (numerical) models requires significant computing resources, a great deal of time for computational experiments, and a large number of input parameters, which is not practical for the daily use of such models in practice. Therefore, the development of fast-computing, multi-factor numerical models for daily practical use remains a critical issue.

The second chapter of the dissertation examines a set of mathematical models for determining the concentration fields of activated sludge, substrate, dissolved oxygen, and air bubbles in aeration tanks. A comprehensive two-dimensional model is proposed for analyzing biological wastewater treatment in an aeration tank; the model allows for simulating the biological wastewater treatment process while accounting for the non-uniform concentration fields of activated sludge, substrate, and dissolved oxygen within the structure; the model is "closed" by Monod equations; a distinctive feature of the biological treatment model is the calculation of the propagation of air bubbles in the aerotank from the aerator and the consideration of oxygen transfer from the bubbles to the wastewater.

A comprehensive three-dimensional model is proposed for analyzing biological wastewater treatment in an aeration tank; the model allows for the simulation of the biological wastewater treatment process, taking into account the non-uniform concentration fields of activated sludge, substrate, and dissolved oxygen within the structure; The model is "closed" by Monod's equations; a distinctive feature of the biological treatment model is the calculation of the propagation of air bubbles in the aeration tank from the aerator and the consideration of oxygen transfer from the bubbles to the wastewater. A mathematical model of "technogenic" contamination of the aeration tank due to dust emissions into the structure during aerator operation is proposed.

To solve the hydrodynamic problem in an aeration tank, we propose using two fundamental equations of continuum mechanics: the potential flow model and Euler's equations.

A mathematical model is proposed for solving the problem of determining the optimal location of the aerator in an aerotank. The governing equation is the conjugate mass transfer equation (G. Marchuk's theory). The parameters required for the practical application of biological wastewater treatment models in aerotanks are discussed.

The third chapter of the dissertation examines the development of two-dimensional CFD (computational) models for determining concentration fields of activated sludge, substrate, dissolved oxygen, and air bubbles emerging from the aerator in an aeration tank; The models account for convective transport in the aeration tank and the diffusion process, i.e., the main hydrodynamic parameters influencing the formation of concentration fields in the aeration tank.

The construction of three-dimensional numerical models for determining concentration fields of activated sludge, substrate, dissolved oxygen, and air bubbles emerging from the aerator in an aerotank is considered; the models account for convective transport in the aeration tank, the diffusion process, i.e., the main hydrodynamic parameters influencing the formation of spatial concentration fields in the aeration tank.

The construction of a three-dimensional numerical model for solving the hydrodynamic problem in an aerotank is considered; the calculation of the velocity potential is performed based on an explicit formula, which allows for a simple software implementation of the numerical model.

The construction of two two-dimensional numerical models for solving the hydrodynamic problem in an aerotank is considered; the first model is based on the numerical integration of the velocity potential equation, the second—on the numerical integration of Euler's equations. A distinctive feature of both numerical models is the use of explicit formulas to determine unknown parameters. This makes it possible to implement the developed numerical hydrodynamic models in a straightforward manner.

The construction of a numerical model for solving a multifactorial problem regarding the determination of the optimal location of an aerator in an aerotank is considered.

The developed numerical models have been implemented in software. The resulting code serves as a tool for calculating the velocity potential based on an explicit formula, which allows for a straightforward software implementation of the numerical model. The developed numerical models have been verified; the verification results confirmed the adequacy of the developed models.

The fourth chapter of the dissertation presents the results of a series of computational experiments based on the developed 2D and 3D CFD (numerical) models. The results of calculations of concentration fields of dissolved oxygen, air bubbles, active sludge, and substrate in aeration tanks with complex geometric shapes are presented, for various configurations of aerator placement. The results of a computational experiment to determine the dust concentration field in an aeration tank under “technogenic” environmental pollution from the aerator are presented. An example of solving the problem of determining the optimal location of the aerator in the aeration tank using a developed model based on a coupled equation is shown.

Keywords: wastewater treatment, biogenic element, aerotank, substrate, air bubble, microflora, aeration, water quality, sludge, air jet, mass transfer, hydrodynamics, oxygen regime.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях України:

1. Біляєв М. М., Машихіна П. Б., Побєдьонний Р. П., Чірков А. О., Чирва М. В. Математична модель аналізу кисневого режиму в біореакторі. Наука та прогрес транспорту. 2023. № 1 (105). С. 5–12. DOI: 10.15802/stp2024/303085 (особистий внесок: аналіз стану проблеми, розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).

2. Біляєв М. М., Тимошенко О. А., Калашников А. В., Коваленко А. С., Чірков А. О. Аналіз процесів масопереносу на базі чисельних моделей. Український журнал будівництва та архітектури. 2024. № 6 (024). С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.55.1111> (особистий внесок: розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).

3. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Kyrychenko M. V., Skuratov M. O., Chirkov A. O., Filonenko H. K. Mathematical Models for Water Treatment Problems. Наука та прогрес транспорту. 2025. № 1. С. 5–13. DOI: [10.15802/stp2025/324157](https://doi.org/10.15802/stp2025/324157) (особистий внесок: розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту).

4. Біляєв М. М., Машихіна П. Б., Татарко Л. Г., Чірков А. О., Чирва М. В. Експрес-розрахунок кисневого режиму в очисних спорудах. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 6 (018). С. 29–34. DOI: [10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.29.1004](https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.29.1004) (особистий внесок: аналіз стану проблеми, розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).

5. Biliaiev M. M., Chirkov A. O. Hierarchy of Mathematical Models for Calculating Aeration Tanks. Science and Transport Progress. 2026. № 1(113). P. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2026/352713> (особистий внесок: розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Біляєв М.М., Козачина В.В., Коваленко А.С., Чірков А.О., Чирва М. В. Математичне моделювання процесів масопереносу та гідродинаміки.

Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (Дніпро, 1-3 листопада 2023р.)

C.30. (особистий внесок: розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту, моделювання роботи біореактору).

7. Біляєв М.М., Коваленко А.С., Козачина В.В., Скуратов М.О., Чірков А.О. Математичне моделювання динаміки водних потоків. Тези. XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорт, в промисловості і освіті» Присвячено пам'яті Владислава Скалозуба.(Дніпро, 12.12.2024 – 13.12.2024 рр.) С.112. (особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для моделювання роботи аеротенків).

8. Біляєв М.М., Чірков А.О., Чирва М.В., Коваленко А.С. Математичні моделі при розрахунку очисних споруд . Conference proceedings. XIII International scientific and practical conference. A substantive representation of the system of scientific knowledge. (March 27-28 Riga, Latvia) С.75. (особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для моделювання роботи аеротенків, проведення обчислювальних експериментів).

9. Козачина В.В., Коваленко А.О., Чірков А.О. Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасопереносу. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» Дніпро. С.207-208. (особистий внесок: розробка багатофакторних чисельних моделей та комп'ютерних кодів для моделювання роботи аеротенків, проведення обчислювальних експериментів).

10. Побєдзонний Р.П., Чірков А.О. Моделювання нестационарних процесів в очисних спорудах. Всеукраїнська науково – технічна конференція студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2023». Дніпро. С.100-101. (особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для моделювання роботи аеротенків, проведення чисельних експериментів).

11. Чірков А.О., Чирва М.В., Коваленко А.С. Моделювання систем очистки стічних вод. Conference proceedings. XI «Implementation of modern scientific opinions in practice» (Bilbao, Spain. March 20-22, 2023) С.262. (особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для моделювання роботи аеротенків, проведення чисельних експериментів).