

УДК 519.6

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.115>

© В.А. Козачина¹, О.В. Громова¹, О.Ю. Гунько¹, В.Ю. Каспійцева², М.В. Чирва¹

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна

² Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна

РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД НА БАЗІ ЕКСПРЕС МОДЕЛІ

© V. Kozachyna¹, O. Gromova¹, O. Gunko¹, V. Kaspiitseva², M. Chirva¹

¹ Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine

² State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro, Ukraine

WASTE WATER TREATMENT CALCULATION ON THE BASIS OF EXPRESS MODEL

Мета. Метою роботи є розробка чисельної моделі для розрахунку ефективності очищення стічних вод у відстійнику. Розроблена чисельна модель може бути застосована для моделювання поля швидкості і перенесення забруднювача в очисних спорудах, з урахуванням їх геометричної форми і при наявності додаткових елементів всередині споруди.

Методика досліджень. Для математичного моделювання процесу очищення стічних вод у відстійнику застосовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища. Для розрахунку поля швидкості в горизонтальному відстійнику використовується модель безвихрових течій ідеальної рідини (модель потенційної течії). Побудова поля концентрації домішки в горизонтальному відстійнику ґрунтується на чисельному рішенні рівняння масопереносу. Дане рівняння враховує перенесення домішки конвекцією і за рахунок дифузійного переносу. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується двокрокова схема умовної апроксимації. Чисельне інтегрування рівняння масопереносу здійснюється за допомогою кінцево-різницевої схеми розщеплення. Попередньо моделююче рівняння масопереносу розщеплюється на два рівняння. Перше рівняння описує перенесення домішки за рахунок конвекції. Друге рівняння описує перенесення домішки за рахунок дифузії. Для кожного рівняння будується різницева схема чисельного інтегрування таким чином, щоб на кожному кроці невідоме значення концентрації домішки розраховувалося за явною формулою.

Результати дослідження. На основі побудованої чисельної моделі розроблено пакет програм. Пакет програм дає можливість оперативно розрахувати поле концентрації домішки в горизонтальному відстійнику і ефективність очищення. Представлені результати розрахунків по визначенню ефективності очищення стічних вод в горизонтальному відстійнику всередині якого розміщені додаткові конструктивні елементи, що впливають на гідродинаміку потоку.

Наукова новизна. Розроблено швидкорозраховуючу чисельну модель для розрахунку процесу масопереносу домішки, що міститься в стічних водах, в горизонтальному відстійнику. Горизонтальний відстійник має додаткові конструктивні елементи. Побудована чисельна модель дозволяє проводити розрахунок процесу масопереносу у відстійниках, що мають складну геометричну форму, нерівномірне поле швидкості потоку стічних вод в очисній споруді, дифузіїю.

Практичне значення. Розроблена чисельна модель дозволяє в режимі реального часу оцінювати ефективність роботи горизонтального відстійника. Чисельна модель може бути використана при проведенні серійних розрахунків на етапі проектування споруд для очищення стічних вод.

Ключові слова: очищення стічних вод; математичне моделювання; відстійник, очисні споруди.

Вступ. В даний час проводиться реконструкція багатьох споруд, які використовуються для очищення стічних вод. Під час реконструкції необхідно оперативно розрахувати ефект очищення при роботі очисних споруд в умовах різних режимів експлуатації, при різному рівні забруднення стічних вод [1, 2]. Рішення даного завдання може бути отримано тільки методом математичного моделювання, бо проведення фізичного експерименту вимагає великих витрат часу, застосування коштовного устаткування. В даний час, для оцінки ефективності роботи очисних споруд застосовуються математичні моделі різного рівня: емпіричні, регресивні, аналітичні, чисельні [1, 3-7].

У практиці проектування досить часто застосовують емпіричні моделі. Моделі цієї групи дають можливість швидко визначити необхідні параметри, проте вони застосовані тільки для розрахунку «класичних» очисних споруд. Якщо очисні споруди мають додаткові конструктивні елементи в зоні течії, дані моделі - не можна застосовувати. Розрахунок споруд складної геометричної форми може здійснюватися на базі CFD моделей [3, 4, 6, 7]. В даний час, в Україні є обмежена кількість моделей даного класу. У зв'язку з цим, розробка CFD моделей являє собою важливе завдання.

Метою даної роботи є розробка чисельної (CFD) моделі для розрахунку очищення стічних вод у горизонтальних відстійниках.

Постановка задачі. Розглядається потік стічних вод у горизонтальному відстійнику з конструктивними елементами, що встановлені в зоні течії.

Методика. Для моделювання потоку в горизонтальному відстійнику застосовується модель безвихрових течій ідеальної рідини (модель потенційної течії). Рівняння моделі має вигляд [8-10]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 P}{\partial^2 y} = 0;$$
$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (1)$$

де P – потенціал швидкості.

Для рівняння (1) встановлюються граничні умови:

1. на твердих межах $\partial P / \partial \mathbf{n} = 0$,

де \mathbf{n} – одинична зовнішня нормаль до межі;

2. на межі втікання: $\partial P / \partial \mathbf{n} = V_n$ (V_n – задане значення швидкості);

3. на межі виходу потоку зі споруди $P = P_0 + \text{const}$ (P_0 – довільне) число.

Моделювання процесу перенесення домішки у горизонтальному відстійнику здійснюється на базі рівняння конвективно-дифузійного масопереносу [3, 4, 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad}C); \quad (2)$$

де $C(x, y) = \frac{1}{H} \int_0^H C(x, y, z) dz$ – усереднена концентрація домішки; H – глибина горизонтального відстійника; u, v – компоненти вектору швидкості; t – час; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії.

Для рівняння (2) ставляться наступні граничні умови:

1. На вході у відстійник:

$$C = C_{in},$$

де C_{in} – відома концентрація домішки.

2. На виході з відстійника:

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

де $C(i+1, j)$ – значення концентрації домішки в останньому різницевому осередку; $C(i, j)$ – концентрація домішки в попередньому різницевому осередку.

3. На твердих стінках:

$$\partial C / \partial n = 0,$$

Для рівняння (2) ставиться така початкова умова:

$$C = C_0,$$

де C_0 – відома концентрація домішки в відстійнику.

Чисельна модель. Для чисельного розв'язання моделюючих рівнянь будемо використовувати кінцево-різницеві методи. Чисельне рішення рівняння масопереносу проводиться за допомогою методу розщеплення. Спочатку, рівняння (2) розщеплюється так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (4)$$

На наступному етапі виконуємо апроксимацію похідних для кожного рівняння [3, 4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Похідні, що пов'язані зі швидкістю потоку, записуємо так:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

З урахуванням цих залежностей різницева схема записується так:

– на кроці $k = 1/2$:

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) = 0; \quad (5)$$

– на кроці $k = 1, c = n+1/2$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) = 0. \quad (6)$$

На кожному кроці (5), (6) невідоме значення концентрації домішки розраховується за явною формулою.

Для чисельного інтегрування рівняння (1) попередньо наведемо його до еволюційного виду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 P}{\partial^2 y}, \quad (7)$$

де t – фіктивний час.

Далі для рівняння (7) будується наступна схема розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (8)$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

Значення потенціалу швидкості на кожному дробовому кроці визначається по явною схемою «бегущего счета».

Розрахунок поля потенціалу швидкості закінчується при виконанні умови:

$$\left| P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^n \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Після визначення поля потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектору швидкості потоку в горизонтальному відстійнику:

$$u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для програмування побудованої чисельної моделі використовувався ФОРТРАН.

Алгоритм розв'язання задачі:

- у файлі вихідних даних формується вид розрахункової зони;
- задаються вхідні параметри завдання (вхідні швидкість потоку стічних вод, наявність додаткових елементів і т.п.);
- здійснюється розв'язок рівняння для потенціалу швидкості;
- здійснюється розрахунок поля швидкості потоку в горизонтальному відстійнику;
- здійснюється розв'язок рівняння масопереносу і визначається поле концентрації домішки у відстійнику.

Результати. Нижче на рисунках наведено розподіл концентрації домішки в очисній споруді. Концентрація дана у відсотках від максимальної концентрації домішки у відстійнику. Таким чином, якщо, наприклад, на матриці зображено число 15, це означає, що в даній точці концентрація становить 15% від максимуму. Розглядалися два варіанти конструкції очисної споруди. У першому варіанті – всередині відстійника розташовуються два додаткові елементи: похила пластина і вертикальна пластина. Другий варіант – всередині відстійника розташовуються три додаткові елементи: похила пластина і дві вертикальні пластини.

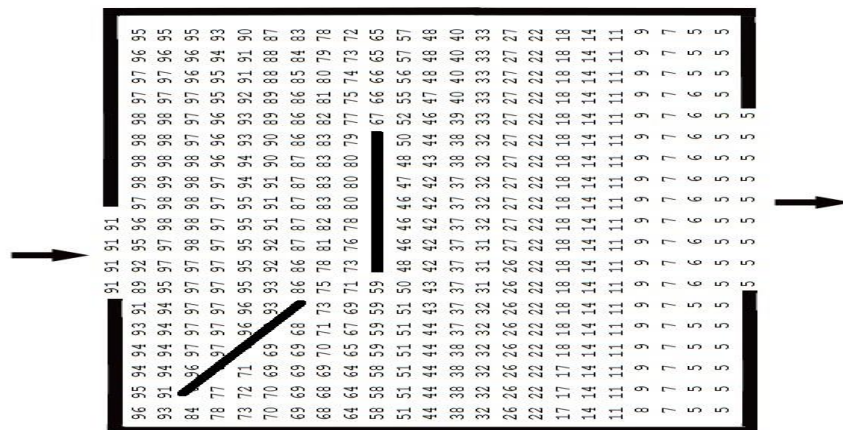


Рис. 1. Поле концентрації домішки (варіант №1)

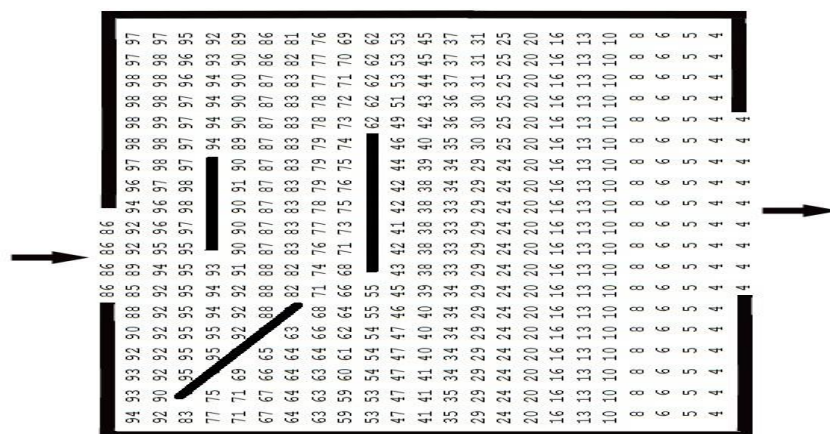


Рис. 2. Поле концентрації домішки (варіант №2)

Для оцінки ефективності роботи горизонтального відстійника необхідно проаналізувати концентрацію домішки на виході з очисної споруди. З рис. 1, 2 видно, що в першому варіанті ефективність очищення води становить 95%, а в другому варіанті – 96%.

Висновки. У статті розглянута ефективна чисельна (CFD) модель, розроблена для оцінки ефективності очищення води у горизонтальному відстійнику. Розрахунок поля швидкості потоку в споруді та перенесення домішки здійснюється на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Надалі слід розвивати наведене моделювання в напрямку створення 3D чисельної моделі.

Перелік посилань

1. Василенко, О.А., Грабовський, П.О., Ларкіна, Г.М., Поліщук, О.В., & Прогульний, В.Й. (2010). *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення. Навч. посіб.* ІВНВКП «Укрґеліотек».
2. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347–348.
<https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
3. Беляев, Н.Н., & Нагорная, Е.К. (2012). *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения. Монография.* Новая идеология.
4. Беляев, Н.Н., & Козачина, В.А. (2015). *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках. Монография.* Акцент ПП.
5. Епоян, С.М., Колотило, В.Д., & Друшляк, О.Г. (2010). *Водопостачання та очистка природних вод. Навчальний посібник.* Фактор.
6. Griporio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses.* University of New Orleans : USA.
7. Młyński, D., Bugajski, P., & Młyńska, A. (2019). Application of the Mathematical Simulation Methods for the Assessment of the Wastewater Treatment Plant Operation Work Reliability. *Water*, 11(5), 873.
<https://doi.org/10.3390/w11050873>
8. Марчук, Г.И. (1982). *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.* Наука.
9. Згуровский, М.З., Скопецкий, В.В., Хрущ, В.К., & Беляев Н.Н. (1997). *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде.* Наук. думка.
10. Biliaiev, M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 87-91.
http://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15

АННОТАЦІЯ

Цель. Целью работы является разработка численной модели для расчета эффективности очистки сточных вод в отстойнике. Разработанная численная модель может быть применена для моделирования поля скорости и переноса загрязнителя в очистных сооружениях, с учетом их геометрической формы и при наличии добавочных элементов внутри сооружения.

Методика исследований. Для математического моделирования процесса очистки сточных вод в отстойнике применяются фундаментальные уравнения механики сплошной среды. Для расчета поля скорости в горизонтальном отстойнике используется модель безвихревых течений идеальной жидкости (модель потенциального течения). Построение поля концентрации

примеси в горизонтальном отстойнике основывается на численном решении уравнения массопереноса. Данное уравнение учитывает перенос примеси конвекцией и за счет диффузионного переноса. Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости используется двухшаговая схема условной аппроксимации. Численное интегрирование уравнения массопереноса осуществляется с помощью конечно-разностной схемы расщепления. Предварительно, моделирующее уравнение массопереноса расщепляется на два уравнения. Первое уравнение описывает перенос примеси за счет конвекции. Второе уравнение описывает перенос примеси за счет диффузии. Для каждого уравнения строится разностная схема численного интегрирования таким образом, чтобы на каждом шаге неизвестное значение концентрации примеси рассчитывалось по явной формуле.

Результаты исследования. На основе построенной численной модели разработан пакет программ. Пакет программ дает возможность оперативно рассчитать поле концентрации примеси в горизонтальном отстойнике и эффективность очистки. Представлены результаты расчетов по определению эффективности очистки сточных вод в горизонтальном отстойнике внутри которого размещены дополнительные конструктивные элементы, влияющие на гидродинамику потока.

Научная новизна. Разработана быстро считающая численная модель для расчета процесса массопереноса примеси, содержащейся в сточных водах, в горизонтальном отстойнике. Горизонтальный отстойник имеет дополнительные конструктивные элементы. Построенная численная модель позволяет проводить расчет процесса массопереноса в отстойниках, имеющих сложную геометрическую форму, неравномерное поле скорости потока сточных вод в очистном сооружении, диффузию.

Практическое значение. Разработанная численная модель позволяет в режиме реального времени оценивать эффективность работы горизонтального отстойника. Численная модель может быть использована при проведении серийных расчетов на этапе проектирования сооружений для очистки сточных вод.

Ключевые слова: очистка сточных вод; математическое моделирование; отстойник, очистные сооружения

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the work is to develop a numerical model for calculating the efficiency of wastewater treatment in a sump. The developed numerical model can be applied to simulate the velocity field and pollutant transfer in treatment facilities, taking into account their geometric shape and in the presence of additional elements inside the facility.

Methodology. For mathematical modeling of the wastewater treatment process in the sump, the fundamental equations of continuum mechanics are used. To calculate the velocity field in a horizontal settler, a model of irrotational flows of an ideal fluid (potential flow model) is used. The construction of the field of impurity concentration in a horizontal sump is based on the numerical solution of the mass transfer equation. This equation takes into account the transport of impurities by convection and due to diffusion transport. For the numerical integration of the equation for the velocity potential, a two-step conditional approximation scheme is used. Numerical integration of the mass transfer equation is carried out using a finite-difference splitting scheme. Previously, the modeling equation of mass transfer is split into two equations. The first equation describes the transport of impurities due to convection. The second equation describes the transfer of impurities due to diffusion. For each equation, a difference scheme of numerical integration is constructed in such a way that at each step the unknown value of the impurity concentration is calculated using an explicit formula.

The results. A software package was developed on the basis of the constructed numerical model. The software package makes it possible to quickly calculate the field of impurity concentration in the horizontal settler and the cleaning efficiency. The paper presents the results of calculations to determine the efficiency of wastewater treatment in a horizontal settling tank inside which additional structural elements are located, which affect the flow hydrodynamics.

Scientific novelty. A fast calculating numerical model has been developed for calculating the process of mass transfer of an impurity contained in wastewater in a horizontal settling tank. The horizontal sump has additional structural elements. The constructed numerical model makes it possible to calculate the process of mass transfer in sedimentation tanks with a complex geometric shape, an uneven field of wastewater flow velocity in a treatment plant, and diffusion.

Practical significance. The developed numerical model makes it possible to evaluate the efficiency of the horizontal sump robots in real time. The numerical model can be used for serial calculations at the design stage of wastewater treatment facilities.

Keywords: *cleaning of drains; math modeling; sump, sewage treatment plant.*