

УДК 519.6:628.33

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.62.1024

МОДЕЛЮВАННЯ МАСОПЕРЕНОСУ У СПОРУДАХ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
КОВАЛЕНКО А. С.², *аспір.*,
ПОБЕДЬОННИЙ Р. П.³, *аспір.*,
ЧИРВА М. В.⁴, *аспір.*

^{1*} Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0009-0009-9761-4300

³ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0009-0009-6551-1630

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-1416-9482

Анотація. *Постановка проблеми.* Проектування систем очищення стічних вод – складний процес, що потребує використання спеціальних математичних моделей. Як правило, на етапі проектування споруд систем водовідведення використовуються емпіричні моделі, що дозволяють отримати лише «інтегральну» характеристику ефективності очищення стічних вод. Але в низці випадків важливо мати інформацію щодо просторового розподілу концентрації домішки в споруді. Для розв'язання даної задачі потрібно мати тривимірні математичні моделі. Наразі існує дефіцит таких моделей, тому створення тривимірних багатофакторних моделей для аналізу ефективності споруд систем водовідведення бачиться актуальним. **Мета роботи** – розроблення тривимірної чисельної моделі для аналізу процесу масопереносу для визначення концентрації домішки у відстійнику. **Методика.** Аналіз концентраційних полів домішки у відстійнику здійснюється шляхом чисельного інтегрування тривимірного рівняння для потенціалу швидкості та тривимірного рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості застосовується змінно-трикутний метод та метод Лібмана. Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки використовуються скінченорізницькі схеми розщеплення. **Наукова новизна.** Створено динамічну багатофакторну чисельна модель для аналізу процесу масопереносу домішки у відстійнику шляхом обчислювального експерименту. **Практична значущість.** Побудована багатофакторна чисельна модель дає можливість аналізувати ефективність очищення стічних вод у відстійниках, що мають складну геометричну форму та не можуть бути розраховані на базі існуючих інженерних методик. **Висновки.** На базі розробленої тривимірної чисельної моделі створено комп'ютерний код, що дозволяє оперативнo отримати інформацію про розподіл концентрації домішки у відстійнику.

Ключові слова: *стічні води; відстійник; чисельне моделювання; масоперенос; обчислювальний експеримент*

MODELLING OF MASS TRANSFER IN WASTEWATER FACILITIES

BILIAIEV M.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVALENKO A.S.², *Postgrad. Stud.*,
POBIEDONNYI R.P.³, *Postgrad. Stud.*,
CHYRVA M.V.⁴, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-9761-4300

³ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-6551-1630

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 373-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-1416-9482

Abstract. Problem statement. The design of wastewater treatment systems is a complex process and requires the use of special mathematical models. As a rule, empirical models are used at the stage of designing structures of water drainage systems, which allow obtaining only an “integral” characteristic of the efficiency of wastewater treatment. But in a number of cases, it is important to have information about the spatial distribution of the impurity concentration in the structure. To solve this problem, you need to have three-dimensional mathematical models. In the future, there is a shortage of such models, so the creation of three-dimensional multifactorial models for the analysis of the efficiency of drainage system structures is an urgent task. **The purpose of the article.** Development of a three-dimensional numerical model for the analysis of the mass transfer process to determine the impurity concentration in the clarifier. **Methodology.** The analysis of impurity concentration fields in the clarifier is carried out by numerical integration of the three-dimensional equation for the velocity potential and the three-dimensional equation of the convective-diffusion transport of the impurity. For the numerical integration of the Laplace equation for the velocity potential, the variable-triangular method and the Liebmann method are used. Finite-difference splitting schemes are used for numerical integration of the three-dimensional equation of convective-diffusion transport of impurities. **Scientific novelty.** A dynamic multifactorial numerical model was created for the analysis of the process of mass transfer of impurities in a settling tank by conducting a computational experiment. **Practical value.** The built multifactorial numerical model makes it possible to analyze the efficiency of wastewater treatment in clarifiers that have a complex geometric shape and cannot be calculated on the basis of existing engineering methods. **Conclusions.** On the basis of the developed three-dimensional numerical model, a computer code was created, which allows you to quickly obtain information about the distribution of the impurity concentration in the settling tank.

Keywords: sewage; settling tank; numerical modeling; mass transfer; computational experiment

Постановка проблеми. Технологічні схеми очищення води включають у себе різні спеціалізовані споруди (відстійники, аеротенки, пісколовки тощо) (рис. 1). На етапі проектування таких систем та обґрунтування параметрів очисних споруд, зокрема, на етапі фор-ескізу, потрібно мати інформацію про ефективність очищення води для певних режимів їх експлуатації. Тому розроблення методів теоретичного оцінювання роботи очисних споруд системи водовідведення стає науковим напрямом, що продовжує активно розвивається [1; 2; 7–9, 11–13].

Складність розроблення таких моделей пов'язана з тим, що модель повинна враховувати багато факторів: нерівномірність поля швидкості, вплив дифузійних процесів на масоперенос, гравітаційне осадження домішки, хімічне перетворення тощо. Саме тому кількість багатофакторних математичних моделей обмежена.

На практиці більш активно використовуються емпіричні, аналітичні моделі [3–6; 10]. Але якість прогнозу інформації потребує більш поширеного використання багатофакторних чисельних моделей. У зв'язку із цим створення таких моделей бачиться актуальним та відповідає сучасним трендам у галузі водопостачання та водовідведення.



Рис. 1. Горизонтальний відстійник
(https://eco-systema.com/productions/modules/otstoynik_tonkosloynnyiy/)

Мета статті – створення 3D чисельної багатофакторної моделі для аналізу процесу масопереносу у відстійнику, що використовується для очищення стічних вод.

Методика. Для аналізу процесу очищення стічних вод у відстійнику використовується 3D-рівняння конвективно-дифузійного переносу пасивної домішки [1; 2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

де C – концентрація забруднювача у відстійнику; u, v, w – проекції вектора швидкості потоку у споруді; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти дифузії; w_g – швидкість гравітаційного осадження; t – час.

Для рівняння (1) ставляться такі граничні умови:

1) на вході в споруду: $C = C_{in}$, де C_{in} – відома концентрація забруднювача;

2) на виході зі споруди: $C(i+1, j, k) = C(i, j, k)$, де $C(i+1, j, k)$ – концентрація забруднювача в останній обчислювальній комірці; $C(i, j, k)$ – концентрація забруднювача в попередній обчислювальній комірці;

3) на твердих поверхнях у споруді:

$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$, де n – одинична нормаль до твердої поверхні.

Для рівняння (1) ставиться початкова умова: $t = 0: C = C_0$.

Для використання рівняння (1) потрібно визначити поле швидкості в очисній споруді. Для розв'язання задачі гідродинаміки використовується модель потенціального руху [1; 2]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для моделювального рівняння (2) розглянути в [1; 2]:

Якщо поле потенціалу швидкості в споруді відоме, компоненти вектора швидкості потоку розраховуються так [2]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}, w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (3)$$

Таким чином, математична модель процесу очищення стічних вод у відстійнику базується на розв'язанні рівнянь (1) та (2) з відповідними крайовими умовами.

Чисельна модель. Чисельне інтегрування моделювальних рівнянь (1) та (2) здійснюється на прямокутній сітці. Для формування геометричної форми розрахункової області застосовується метод маркування.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості застосовується метод розщеплення. На першому етапі рівняння Лапласа зводиться до нестационарного вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (4)$$

де t – фіктивний час.

Далі, для чисельного інтегрування рівняння (9) застосовуються змінно-трикутний метод та метод Лібмана.

У разі застосування змінно-трикутного методу різниці рівняння мають вигляд:

– на першому кроці розщеплення:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{0,5\Delta\eta} &= \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j,k+1}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}, \end{aligned}$$

– на другому кроці розщеплення:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} &= \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j,k-1}^{n+1/2}}{\Delta z^2}. \end{aligned}$$

Тобто визначення потенціалу швидкості здійснюється за два етапи. На першому знаходиться «проміжне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1/2}$ на часовому шарі « $n + 1/2$ », а на другому – «остаточне» значення потенціалу $P_{i,j,k}^{n+1}$ на часовому шарі « $n + 1$ ».

Інший підхід – метод Лібмана для чисельного інтегрування рівняння (2). В даному випадку різницева рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} &\frac{P_{i+1,j,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j+1,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{P_{i,j,k+1} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} = 0. \end{aligned}$$

Значення $P_{i,j,k}$ обчислюється за явною формулою з даної залежності.

На наступному етапі розраховуються компоненти вектора швидкості потоку на гранях різницевих комірок :

$$u = \frac{P_{i+1,j,k} - P_{i,j,k}}{\Delta x},$$

$$v = \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j,k}}{\Delta y},$$

$$w = \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k}}{\Delta z}.$$

Після розрахунку поля швидкості потоку стічних вод розв'язується рівняння (1) для визначення концентрації забруднювальної речовини.

Для побудови першої схеми здійснюється таке фізичне розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (6)$$

Тут ми приймаємо, що $w = w - w_s$.

Для чисельного розв'язання рівняння масопереносу (5) використовуємо схему розщеплення [2]. Для чисельного розв'язання рівняння (6) використовується наступна різницева схема розщеплення [2] :

– перший крок :

$$C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} = C_{ijk}^n - Vt \frac{w_{i+1,jk}^+ C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} - w_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz} +$$

$$+ Vt \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,jk}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz^2} + Vt \mu_z \frac{-C_{ijk}^n + C_{i+1,jk}^n}{Vz^2},$$

– другий крок :

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{w_{i+1,jk}^- C_{i+1,jk}^{n+1} - w_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{Vz} +$$

$$+ Vt \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,jk}^{n+\frac{1}{2}}}{Vz^2} + Vt \mu_z \frac{-C_{ijk}^{n+1} + C_{i+1,jk}^{n+1}}{Vz^2}.$$

Концентрація домішки визначається за явною формулою «рахунку, що біжить».

Для контролю розв'язання задачі масопереносу також використовувалася, додатково, інша схема розщеплення. Для побудови цієї схеми здійснюється розщеплення рівняння (1) таким чином :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (9)$$

Рівняння переносу (7)–(9) – це одновимірні рівняння масопереносу. Принцип побудови різницевої схеми розглянемо на прикладі одного рівняння.

Для побудови різницевої схеми робляться такі перетворення :

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

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

$$\frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; v^+ = \frac{v + |v|}{2};$$

$$v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

Далі йде така апроксимація похідних :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$- \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$- \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

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

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

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

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

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}.$$

Після цих перетворень записується схема розщеплення для одновимірного рівняння масопереносу (7):

– на першому кроці розщеплення рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n,$$

– на другому кроці розщеплення рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}.$$

Аналогічно, схема розщеплення для чисельного розв'язання рівняння (8) записується так:

– на першому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_y^+ C^k = M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n,$$

– на другому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_y^- C^{n+1} = M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (9) має вигляд:

– на першому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n,$$

– на другому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}.$$

Значення концентрації забруднювальної речовини розраховується за формулою «розрахунку, що біжить» на кожному кроці розщеплення.

На базі побудованих різницевоїх схем створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту.

Результати. Далі наведено результати обчислювального експерименту на базі розробленої чисельної моделі. Мета обчислювального експерименту – дослідження можливості використання побудованої чисельної моделі для аналізу процесу масопереносу у відстійнику, що має складну геометричну форму в області руху стічних вод. Крім цього, ставиться задача дослідити «практичну» стійкість побудованої чисельної моделі, тобто її спроможність проводити розрахунки в областях складної геометричної форми без втрати стійкості.

Моделювання виконувалося за таких даних: розміри відстійника 15 м*5 м*4 м. $w_g = 0,003 \text{ мм/с}$; коефіцієнти дифузії визначаються так: $\mu_x = 0,1u$, $\mu_y = 0,1v$, $\mu_z = 0,1w$. Початкова умова така: $C = 0$ при $t = 0$. Під час обчислювального експерименту розглядалися такі сценарії:

1. Сценарій № 1: відстійник, на дні якого розташовані два додаткові елементи (екрани).

2. Сценарій № 2: відстійник на дні якого розташовані два додаткові елементи (екрани) + короткий екран зверху.

3. Сценарій № 3: відстійник, на дні якого розташовані два додаткові елементи (екрани) + довгий екран зверху.

Результати обчислювального експерименту показані на рисунках 2–4: розподіл безрозмірного значення концентрації домішки в перерізі $y = 2,5 \text{ м}$.

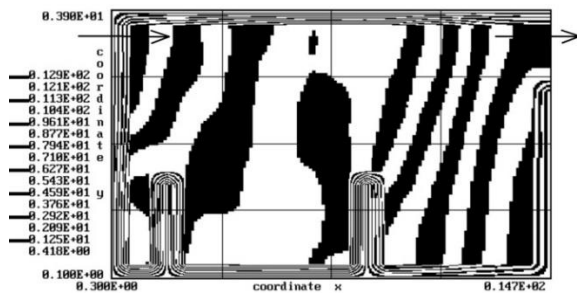


Рис. 2. Концентрація домішки, переріз $y = 2,5$ м (сценарій № 1)

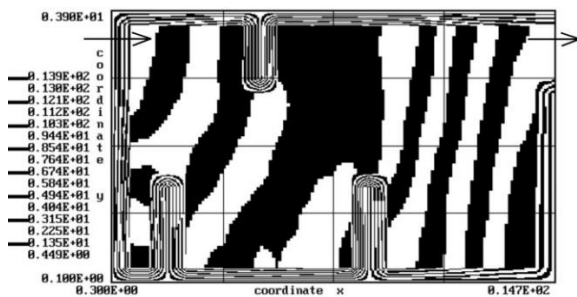


Рис. 3. Концентрація домішки, переріз $y = 2,5$ м (сценарій № 2)

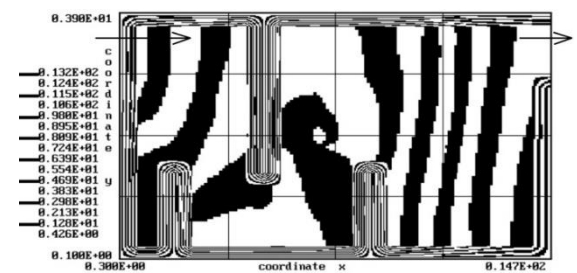


Рис. 4. Концентрація домішки, переріз $y = 2,5$ м (сценарій № 3)

Як видно з наведених рисунків, екрани впливають на гідродинаміку течії у відстійнику, що зумовлює утворення складної за формою області розподілу домішки у споруді. Також можна бачити формування застійних зон за кожним екраном. Перед екранами, розташованими

на дні споруди, також формуються застійні зони, що зумовлено гальмуванням потоку стічних вод.

Зазначимо, що час розрахунку кожного сценарію склав 15 с, руйнування стійкості чисельної моделі не було.

Наукова новизна та практична цінність. Запропоновано тривимірну чисельну модель для аналізу процесу очищення стічних вод у відстійнику. Модель враховує основні фізичні параметри, що впливають на процес масопереносу у відстійнику: гідродинаміку течії, дифузію, гравітаційне осадження домішки.

Побудована чисельна модель дозволяє аналізувати розподіл концентрації домішки у споруді за декілька секунд.

Розроблена математична модель може бути використана для оцінювання ефективності очищення стічних вод на етапі проектування систем механічного очищення стічних вод.

Подальший розвиток цього напрямку буде здійснюватися в напрямку створення прогностичної моделі на базі рівнянь Нав'є–Стокса.

Висновки

1. Розроблено тривимірну чисельну модель для розрахунку процесу масопереносу домішки у відстійнику.
2. Побудована модель дозволяє прогнозувати поле концентрації домішки за декілька секунд, що дуже важливо для проведення серійних розрахунків на етапі проектування очисних споруд водовідведення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения: монография. Днепропетровск: Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках: монография. Днепропетровск: Акцент ПП, 2015. 115 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: навч. посіб. Київ: ІВНВП «Укреліотек», 2010. 272 с.
4. Ковальчук В. А. Очистка стічних вод: навчальний посібник. Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. 622 с.
5. Олейник А. Я., Киселев С. К., Малько В. Ф., Ягодковская О. Н. Методика инженерного расчета вторичных вертикальных отстойников. Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук.-техн. зб. № 7. Київ: КНУБА, 2006. С. 65–82.

6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Теорія і розрахунки біологічної очистки стічних вод в аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим на додаткових пристроях біоценозом. *Прикладна гідромеханіка*. Том 17, № 3. 2015. С. 35–43.

7. Lledo Prades Martell Computational Fluid Dynamics Techniques for Fixed – Bed Biofilm Systems Modelling: Numerical Simulation and Experimental Characterization. Doctoral Thesis. Manresa, October 2018. 201 p.

8. Meghdad Pirsaeheb, Mitra Mohammadi, Abdollahdargahi Ali Almasi, Marzieh Naderi. Modeling and kinetic evaluation of intermittent aeration bioreactor with continuous flow in hospital wastewater treatment. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 1 JCPS. Vol. 9, iss. 4. 2016.

9. Ramalingam K., Xanthos S., Gong M. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*. UK: Alliance House, 2012. Vol. 65 (6). Pp. 1087–1094.

10. Pereda M., Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis*. Corfu, Greece, June 20–23, 2011. Pp. 1128–1133.

11. Robescu D., Mandiș C., Robescu D. Design Lamellar Secondary Settling Tank Using Numerical Modeling. *U.P.B. Sci. Bull. Series D*. Vol. 72, iss. 4. București, 2010. Pp. 211–216.

12. Robesku Diana, Robesku Dan, Mocanu Raluca, Moga Corina. Modeling of attached growth biological wastewater treatment process. *U.P.B. Sci. Bull. Series C*. Vol. 64, № 4. 2007. Pp. 593–598.

13. Shahrokhi M., Rostami F., Azlin Md, Said Md, Syafalni. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology*. Vol. 6. Singapore, 2011. Pp. 392–396.

REFERENCES

1. Biliaiev N.N. and Nagornaya E.K. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya : monografiya* [Mathematical modeling of mass transfer in settling tanks of water drainage systems : monograph]. Dnipropetrovsk : Novaya Ideologiya Publ., 2012, 112 p. (in Russian).

2. Biliaiev N.N. and Kozachina V.A. *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh : monografiya* [Mathematical modeling of mass transfer in horizontal settling tanks : monograph]. Dnipropetrovsk : Aktsent PP, 2015, 115 p. (in Russian).

3. Vasylenko O.A., Hrabovskyi P.O., Larkina H.M., Polishchuk O.V. and Prohulnyi V.Y. *Rekonstruksiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia : navchalnyi posibnyk* [Reconstruction and intensification of water supply and drainage facilities]. Kyiv : IVNVKP “Ukrheliotek”, 2010, 272 p. (in Ukrainian).

4. Kovalchuk V.A. *Ochystka stichnyh vod: navchalnyj posibnyk* [Educational manual: Sewage treatment]. Rivne : VAT “Rivnenska drukarnya”, 2002, 622 p. (in Ukrainian).

5. Oleynik A.Y., Kiselev S.K., Malko V.F. and Yagodovskaya O.N. *Metodyka inzhenerного rascheta vtorychnyh vertykalnyx otstojnykiv* [Methods of engineering calculation of secondary vertical sedimentation tanks]. *Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliki : nauk.-tekhn. zb* [Applied hydromechanics : scientific and technical collection]. Vol.7, Kyiv : KNUBA, 2006, pp. 65–82. (in Ukrainian).

6. Oleynik A.Y. and Airapetyan T.S. *Teoriya i rozrakhunky biolohichnoyi ochystky stichnykh vod v aerotenkakh zi zvaženym (vil'noplavayuchym) i zakriplenym na dodatkovykh prystroyakh biotsenozom* [Theory and calculations of biological wastewater treatment in aerotanks with suspended (free-floating) biocenosis fixed on additional devices]. *Prykladna hidromekhanika* [Applied Hydromechanics]. 2015, vol. 17, no. 3, pp. 35–43. (in Ukrainian).

7. Lledo Prades Martell. Computational Fluid Dynamics Techniques for Fixed –Bed Biofilm Systems Modelling : Numerical Simulation and Experimental Characterization. Doctoral Thesis. Manresa, 2018, 201 p.

8. Meghdad Pirsaeheb, Mitra Mohammadi, Abdollahdargahi, Ali Almasi and Marzieh Naderi. Modeling and kinetic evaluation of intermittent aeration bioreactor with continuous flow in hospital wastewater treatment. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 1 JCPS, 2016, vol. 9, iss. 4.

9. Ramalingam K., Xanthos S. and Gong M. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*. UK : Alliance House, 2012, vol. 65 (6), pp. 1087–1094.

10. Pereda M. and Zamarreno J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterrian Conference on Control and Automation Aquis*, Corfu, Greece, 2011, June 20–23, pp. 1128–1133.

11. Robescu D., Mandiș C., and Robescu D. Design Lamellar Secondary Settling Tank Using Numerical Modeling. *U.P.B. Sci. Bull, Series D*, 2010, vol. 72, iss. 4. București, pp. 211–216.

12. Robesku Diana, Robesku Dan, Mocanu Raluca and Moga Corina. Modeling of attached growth biological wastewater treatment process. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, 2007, vol.64, no. 4, pp. 593–598.

13. Shahrokhi M., Rostami F., Md Azlin, Md Said and Syafalni. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology*. 2011, vol. 6., Singapore, pp. 392–396.

Надійшла до редакції: 11.03.2024.