

УДК 628.35:519.87

В. А. КОЗАЧИНА^{1*}, В. І. ШИНКАРЕНКО^{2*}, І. О. БОНДАРЕНКО^{3*}, В. О. ГАБРИНЕЦЬ^{4*},
В. М. ГОРЯЧКІН^{5*}^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225^{3*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, ел. пошта igina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032^{4*}Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162^{5*}Каф. «Теплотехніка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-6115-7162МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ
ВІДСТІЙНИКУ

Мета. Підвищення ефективності роботи очисних споруд у системах водопостачання та водовідведення є важливою технічною задачею. Для аналізу ефективності очищення води конкретної споруди, на етапі проектування, потрібно мати спеціальні математичні моделі. Метою цієї роботи є розробка чисельної моделі процесу масопереносу у горизонтальному відстійнику для оцінки ефективності його роботи.

Методика. Процес розповсюдження забруднювача в очисній споруді (відстійнику) розраховують на базі рівняння розповсюдження домішки, що виражає закон збереження маси. Моделювальне рівняння враховує конвективний перенос домішки та перенос домішки за рахунок турбулентної дифузії. Математична модель враховує нерівномірне поле швидкості потоку в споруді. Для визначення цього нерівномірного поля швидкості потоку використано математичну модель течії ідеальної рідини. При цьому враховано вихрову природу потоку.

Результати. Розв'язання моделювальних рівнянь знайдено чисельним шляхом. Для чисельного інтегрування моделювального рівняння переносу в споруді використано різницеві схеми розщеплення. Базове рівняння масопереносу попередньо розщеплено на рівняння, що враховує рух домішки у відстійнику за рахунок конвекції, та на рівняння, що враховує перенос домішки за рахунок дифузії. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь течії невязкої рідини використано неявні різницеві схеми розщеплення. Чисельний розрахунок здійснено на прямокутній різницевій сітці.

Наукова новизна. Особливістю розробленої математичної моделі є можливість визначення поля швидкості та процесу переносу домішки з урахуванням геометричної форми відстійників та можливістю використання в них пластин, що впливають на гідродинаміку потоку в споруді, а значить – на ефективність очищення води.

Практична значимість. Час розрахунку одного варіанта завдання на базі побудованих математичних моделей складає кілька секунд. Моделі можна використати для отримання експертної оцінки роботи очисних споруд, які проектують. Зазначено результати проведеного обчислювального експерименту з визначення ефективності роботи відстійника з двома пластинами.

Ключові слова: очищення води; математичне моделювання; очисні споруди

Вступ

Відстійники відіграють суттєву роль у системах водопостачання та водовідведення. На практиці використовують різні типи відстійників, але в системах очищення дуже часто для

очистки стічних вод використовуються горизонтальні відстійники. Для оцінки ефективності роботи відстійників за різних навантажень, потрібно мати математичні моделі, що дозволяють визначати ступінь очищення стічних вод для конкретних умов експлуатації [1–3, 5, 7–9].

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для розв'язання задач з оцінки ефективності роботи очисних споруд використовують математичні моделі, а саме емпіричні [4, 11] й аналітичні [3, 4, 7, 9, 10, 12]. Недоліком цих моделей є неможливість урахування нерівномірного потоку в споруді та геометричної форми споруди. Тому більш ефективними є чисельні моделі [1, 2, 6, 13], що дозволяють проводити розрахунки з урахуванням геометричної форми споруд. Але недоліком цих моделей є, у деяких випадках, значні витрати комп'ютерного часу їх на практичну реалізацію [13].

Мета

Зважаючи на викладене, метою нашої роботи є розробка чисельної моделі процесу масопереносу у горизонтальному відстійнику для оцінки ефективності його роботи.

Методика

Будемо розглядати рух води з домішками в очисній споруді, наприклад, у горизонтальному відстійнику. Ставимо задачу розробки математичної моделі, що дозволяє визначати ефективність роботи споруди з урахуванням її геометричної форми та гідродинаміки потоку.

Модель гідродинаміки. Найважливішою задачею під час розрахунку очисних споруд систем водопостачання та водовідведення є визначення поля швидкості водного потоку. Це пов'язано з тим, що рух домішок у споруді визначається переважно, конвекцією. Тому під час створення моделей оцінки ефективності роботи очисних споруд розв'язання задачі гідродинаміки постає на першому місці. У роботі будемо використовувати модель рівнянь Нав'є–Стокса для розв'язання задачі гідродинаміки. Моделювальні рівняння мають вигляд:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

де ψ – функція потоку; $\text{Re} = \frac{V_0 L}{\nu}$ – число Рейнольдса; $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ – завихореність; $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ – компоненти вектора швидкості водного потоку; L – характерний лінійний розмір; V_0 – характерна швидкість.

Постановку граничних умов для системи рівнянь (2)–(3) наведено в роботі [2].

Розглянемо побудову різницевих схем для чисельного інтегрування рівнянь Нав'є–Стокса. Представимо швидкість потоку в такому вигляді:

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

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

Виконаємо заміну конвективних похідних так [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial u^- \omega}{\partial x} &\approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x; \\ \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y; \\ \frac{\partial v^- \omega}{\partial y} &\approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y. \end{aligned} \quad (3)$$

Для апроксимації других похідних використовуємо залежності [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} &\approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega = \\ &= (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2; \\ \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} &\approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega = \\ &= (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2, \end{aligned} \quad (4)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де в подальшому різниці оператори $L_{xx}^+, L_{xx}^-, L_{yy}^+, L_{yy}^-$ визначатимуться на різних розрахункових шарах. Замінюючи похідні розділеними різницями (3)–(4), отримуємо наступну різницеву схему [8]:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \left(\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) \left(\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n \right) = \frac{1}{\text{Re}} \left(L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \left(\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n \right). \quad (5)$$

або

$$\left((E + \Delta t \xi) \left(\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) - \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi \left(L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \right) \omega^{n+1} = \left(E - \Delta t (1 - \xi) \left(\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^- \right) + \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1 - \xi) \left(L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \right) \omega^n. \quad (6)$$

Схема (6) за $\xi = 1/2$ має другий порядок точності за часовою координатою, однак для визначення невідомих ω^{n+1} необхідно розв'язувати систему алгебраїчних рівнянь великої розмірності.

Далі записуємо різницеву схему розщеплення [1]:

$$\begin{aligned} \left(E + \frac{\Delta t}{2} \left(\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+ \right) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left(L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \omega^{n+1/2} &= \left(E - \frac{\Delta t}{2} \left(\Lambda_x^- + \Lambda_y^- \right) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left(L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \omega^n; \\ \left(E + \frac{\Delta t}{2} \left(\Lambda_x^- + \Lambda_y^- \right) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left(L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \omega^{n+1} &= \left(E - \frac{\Delta t}{2} \left(\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+ \right) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \left(L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \omega^{n+1/2}. \quad (7) \end{aligned}$$

Розрахунок невідомого значення ω на кожному кроці розщеплення визначаємо за методом біжучого рахунку.

Для чисельного інтегрування рівняння для функції потоку використовуємо метод ітерацій. Для цього рівняння Пуассона приводимо до вигляду:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \quad (8)$$

де η – фіктивний час. Функція $\psi(x, y, \eta)$, будучи розв'язком нестационарного рівняння (3.14), буде розв'язком рівняння Пуассона за $\eta \rightarrow \infty$.

Використана різницева схема має вигляд [1]:

$$\frac{\psi_{ij}^{l+1} - \psi_{ij}^l}{\Delta \eta} = \left(L_{xx}^+ + L_{xx}^- \right) \frac{\psi^{l+1} - \psi^l}{2} + \left(L_{yy}^+ + L_{yy}^- \right) \frac{\psi^{l+1} - \psi^l}{2} + \tilde{\omega}_{ij}; \quad (9)$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = \frac{1}{4} \left(\omega_{ij} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1} \right).$$

Схема розщеплення має вигляд:

$$\begin{aligned} \psi^{l+1/4} &= \psi^l + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2}; \\ \left(E - \frac{\Delta \eta}{2} \left(L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \psi^{l+2/4} &= \left(E + \frac{\Delta \eta}{2} \left(L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \psi^{l+1/4}; \\ \left(E - \frac{\Delta \eta}{2} \left(L_{xx}^- + L_{yy}^- \right) \right) \psi^{l+3/4} &= \left(E + \frac{\Delta \eta}{2} \left(L_{xx}^+ + L_{yy}^+ \right) \right) \psi^{l+2/4}; \\ \psi^{l+1} &= \psi^{l+3/4} + \tilde{\omega} \frac{\Delta \eta}{2}. \quad (10) \end{aligned}$$

Значення функції потоку $\psi^{l+2/4}$, $\psi^{l+3/4}$ визначаємо методом біжучого рахунку на другому та третьому кроках розщеплення.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Компоненти вектора швидкості визначаємо так:

$$u_{ij} = (\psi_{i,j+1} - \psi_{ij}) / \Delta y; \quad v_{ij} = -(\psi_{i+1,j} - \psi_{ij}) / \Delta x.$$

Для формування вигляду розрахункової області використовуємо маркери.

Модель масопереносу у відстійнику.

Після розрахунку нерівномірного поля швидкості потоку у відстійнику необхідно розрахувати рух домішки. Для математичного опису переносу домішки в очисній споруді будемо використовувати рівняння балансу маси [1, 2, 6, 13]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + \sigma C = 0, \quad (11)$$

де C – концентрація домішки; u, v – компоненти вектора швидкості потоку в напрямку осей x і y ; w – гравітаційна швидкість осадження домішки; x, y – Декартові координати; σ – коефіцієнт, що враховує процес флокуляції і розпаду частинок, а також біохімічне окислення.

Крайові умови для рівняння (11) розглянуто в [11].

Для чисельного інтегрування рівняння (11) використовуємо неявну змінно-трикутну схему розщеплення [11].

Результати

На базі побудованої чисельної моделі створено пакет програм. Основні модулі цього пакета наступні:

- 1) підпрограма EVORZ – розрахунок поля вихору на базі рівнянь Нав'є–Стокса;
- 2) підпрограма EFUZ – розрахунок функції потоку на базі рівнянь Нав'є–Стокса;
- 3) підпрограма ECOZ – розрахунок концентрації домішки у відстійнику;
- 4) підпрограма EPRZ – друк результатів обчислювального експерименту.

На рис. 1 показано розподіл домішки у горизонтальному відстійнику. Обчислювальний експеримент на базі побудованої чисельної моделі проведено для відстійника, що має дуже складну геометричну форму. Як відомо, для таких розрахункових областей ряд чисельних методів втрачає стійкість, але побудована чисельна модель не має такого недоліку. Числа

на рис. 1 показують у процентах концентрацію домішки від значення концентрації домішки на вході у відстійник ($C = 99\%$). На базі такої технології можна швидко аналізувати, яка концентрація домішки буде на виході з відстійника.

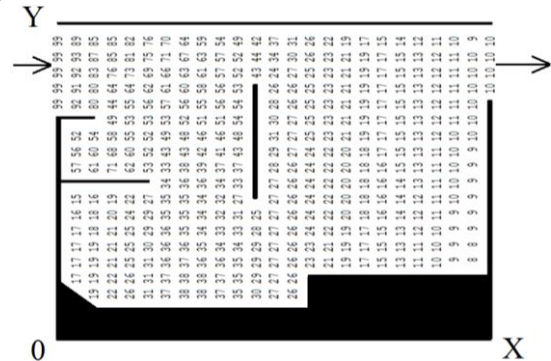


Рис. 1. Концентрація домішки у горизонтальному відстійнику

Fig. 1. Impurity concentration in a horizontal settler

Як ми бачимо з рис. 1, ефективність очищення води в цій споруді буде близько 90 %.

Відзначимо, що час розрахунку склав близько 15 сек.

Наукова новизна та практичне значення

Запропоновано чисельну модель, що базується на рівнянні Нав'є–Стокса та рівнянні переносу домішки у горизонтальному відстійнику. Розроблена модель дозволяє оперативно розраховувати нерівномірне поле швидкості потоку в споруді та розподіл концентрації домішки в споруді. Модель може бути застосована на етапі проектування очисних споруд систем водовідведення.

Висновки

У статті розглянуто чисельну модель, що дозволяє оперативно оцінювати ефективність роботи горизонтальних відстійників. Модель базується на використанні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища.

Подальший розвиток цього наукового напрямку слід проводити в галузі створення 3D-моделей для оцінки ефективності роботи очисних споруд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках / Н. Н. Беляев, В. А. Козачина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. – 115 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Днепропетровск : Новая идеология, 2012. – 112 с.
3. Горносталь, С. А. Аналіз результатів моделювання процесу біологічного очищення стічних вод / С. А. Горносталь, О. А. Петрухов // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, 2014. – № 1. – С. 112–114.
4. ДБН В.2.5-75-2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 128 с.
5. Епоян, С. М. Особливості роботи пористої полімербетонної перегородки водопровідного горизонтального відстійника і її регенерація / С. М. Епоян, Д. Г. Сухоруков // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА. – 2012. – Вип. 69. – С. 327–331.
6. Козачина, В. А. Моделирование процесса массопереноса в отстойнике при импульсной подаче примеси / В. А. Козачина // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, 2015. – № 1 (79). – С. 162–165.
7. Олійник, О. Я. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах / О. Я. Олійник, О. А. Колпакова // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук.-техн. пр. – Київ, 2014. – Вип. 16. – С. 68–86.
8. Олійник, О. Я. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Доповіді НАН України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
9. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності біологічного очищення стічних вод в аеротенках за рахунок зваженого та закріпленого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, 2015. – № 3 (81). – С. 106–109.
10. Олійник, О. Я. Підвищення ефективності роботи аеротенків-витискувачів за рахунок зваженого і зваженого біоценозу / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідрравліки : наук.-техн. зб. – Київ, 2016. – Вип. 26. – С. 123–130.
11. Олійник, О. Я. Розрахунок кисневого режиму при біологічному очищенні стічних вод в аеротенках-змішувачах з закріпленим і зваженим біоценозом / О. Я. Олійник, Т. С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, 2018. – № 4 (98). – С. 187–191.
12. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: навч. посіб. / О. А. Василенко, П. О. Грабовський, Г. М. Ларкін та ін. – К.: ІВНВКП «Укреліотек», 2010. – 272 с.
13. Griborio, A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach / A. Griborio // Dissertation and Theses (for the degree of Doctor of Philosophy in The Engineering and Applied Sciences Program). – University of New Orleans : USA, 2004. – 440 p.

В. А. КОЗАЧИНА^{1*}, В. І. ШИНКАРЕНКО^{2*}, І. О. БОНДАРЕНКО^{3*},
В. А. ГАБРИНЕЦЬ^{4*}, В. М. ГОРЯЧКИН^{5*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{2*}Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{3*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 802 21 80, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{4*}Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@gmail.com, ORCID 0000-0002-6115-7162

^{5*}Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

Цель. Повышение эффективности работы очистных сооружений в системах водоснабжения и водоотведения – важная техническая задача. Для анализа эффективности очистки воды конкретного сооружения, на этапе проектирования, нужно иметь специальные математические модели. Целью данной работы является разработка численной модели процесса массопереноса в горизонтальном отстойнике для оценки эффективности его работы. **Методика.** Процесс распространения загрязнителя в очистном сооружении (отстойнике) рассчитывают на базе уравнения распространения примеси, что выражает закон сохранения массы. Моделирующее уравнение учитывает конвективный перенос примеси и перенос примеси за счет турбулентной диффузии. Математическая модель учитывает неравномерное поле скорости потока в сооружении. Для определения этого неравномерного поля скорости потока используют математическую модель течения идеальной жидкости. При этом учитывают вихревую природу потока. **Результаты.** Решение моделирующих уравнений найдено численным путем. Для численного интегрирования моделирующего уравнения переноса в сооружении использованы разностные схемы расщепления. Базовое уравнение массопереноса предварительно расщеплено на уравнения, учитывающие движение примеси в отстойнике за счет конвекции, и на уравнения, учитывающие перенос примеси за счет диффузии. Для численного интегрирования моделирующих уравнений течения невязкой жидкости использованы неявные разностные схемы расщепления. Численный расчет осуществлен на прямоугольной разностной сетке. **Научная новизна.** Особенностью разработанной математической модели является возможность определения поля скорости и процесса переноса примеси с учетом геометрической формы отстойников и возможностью использования в них пластин, влияющих на гидродинамику потока в сооружении, а значит – на эффективность очистки воды. **Практическая значимость.** Время расчета одного варианта задания на базе построенных математических моделей составляет несколько секунд. Модели можно применить для получения экспертной оценки работы проектируемых очистных сооружений. Описаны результаты проведенного вычислительного эксперимента по определению эффективности работы отстойника с двумя пластинами.

Ключевые слова: очистка воды; математическое моделирование; очистные сооружения

V. A. KOZACHYNA^{1*}, V. I. SHYNKARENKO^{2*}, I. O. BONDARENKO^{3*},
V. A. GABRINET^{4*}, V. M. HORIACHKIN⁵

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{2*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{3*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 802 21 80, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

^{4*}Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

^{5*}Dep. «Heat Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

WATER CLEANING MODELING IN A HORIZONTAL SETTLER

Purpose. Improving the efficiency of wastewater treatment plants in water supply and sanitation is an important technical task. To analyze the effectiveness of water treatment of a particular structure, at the design stage, you need to have special mathematical models. The work is aimed to develop a numerical model of the mass transfer process in a horizontal settler to assess its performance. **Methodology.** The spread of the pollutant in the treatment plant (settler) is calculated on the basis of the distribution equation of the impurity, which expresses the law of mass conservation. The modeling equation takes into account the convective transfer of impurities and the transfer of impurities due to turbulent diffusion. The mathematical model takes into account the uneven flow velocity field in the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

building. To determine this uneven flow velocity field, a mathematical model of the flow of an ideal fluid is used. In this case, the vortex nature of the flow is taken into account. **Findings.** The solution of modeling equations is found numerically. For numerical integration of the modeling transport equation in the structure, difference splitting schemes were used. The basic mass transfer equation is preliminarily split into equations that take into account the movement of an impurity in a settling tank due to convection, and into equations that take into account the transfer of an impurity due to diffusion. For numerical integration of the modeling equations of the inviscid fluid flow, implicit difference splitting schemes are used. The numerical calculation is carried out on a rectangular difference grid. **Originality.** A feature of the developed mathematical model is the possibility of modeling the velocity field and the process of impurity transfer taking into account the geometric shape of the settlers and the possibility of using plates in them, which affect the flow hydrodynamics in the structure and, therefore, the efficiency of water treatment. **Practical value.** The calculation time for one version of the task based on the constructed mathematical models is a few seconds. The models can be used to obtain an expert assessment of the operation of treatment facilities designed. The results of a computational experiment in determining the efficiency of the settler with two plates are presented.

Keywords: water treatment; mathematical modeling; wastewater treatment plants

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
3. Gornostal, S. A., & Petrukhov, O. A. (2014). Analysis of simulation results of biological wastewater treatment process. *Scientific Bulletin of Construction*, 1, 112-114. (in Ukrainian)
4. Kanalizatsiia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia, 128 DBN V.2.5-75-2013 (2013). (in Ukrainian)
5. Epoian, S. M., & Sukhorukov, D. G. (2012). Osoblyvosti roboty porystoi polimerbetonnoi perehorodky vodoprovodnoho horyzontalnoho vidstiinyka i yii reheneratsiia. *Scientific Bulletin of Construction*, 69, 327-331. (in Ukrainian)
6. Kozachina, V. A. (2015). Modeling of the mass transfer process in a sump during impulse supply of impurities. *Scientific Bulletin of Construction*, 1(79), 162-165. (in Russian)
7. Oleynik, A. Y., & Kolpakova, O. A. (2014). Modelling and calculation of bioilgical wastewater treatment to trickling biofilters. *Environmental safety and natural resources*, 16, 68-86. (in Ukrainian)
8. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. doi: <http://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
9. Oliinyk, O. Ya. & Airapetian, T. S. (2015). Pidvyshchennia efektyvnosti biolohichnoho ochyshchennia stichnykh vod v aerotenkakh za rakhunok zvazhenoho ta zakriplenoho biotsenozu. *Scientific Bulletin of Construction*, 3(81), 106-109. (in Ukrainian)
10. Oliinyk, O. Ya. & Airapetyan, T. S. (2016). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty aerotenkiv-vytyskuvachiv za rakhunok zavysloho i zvazhenoho biotsenozu. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 26, 123-130. (in Ukrainian)
11. Oliinyk, O. Ya. & Airapetian, T. S. Rozrakhunok kysnevoho regymu pry biolohichnomu ochyshchenni stichnykh vod v aerotenkakh-zmishuvachakh z zakriplenym I zvagenym biotsenozom. *Scientific Bulletin of Construction*, 4(98), 187-191. (in Ukrainian)
12. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkin, H. M., & others. (2010). *Rekonstruktsiia i intensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navch.posib*. K.: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
13. Griborio, A. (2004). Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses. USA, University of New Orleans Publ. (in English)

Надійшла до редколегії: 13.05.2019

Прийнята до друку: 16.09.2019