

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 628.334.5:519.6

M. M. BILIAIEV<sup>1</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail kozachynav@yandex.ua, ORCID 0000-0002-6894-5532

### NUMERICAL DETERMINATION OF HORIZONTAL SETTLERS PERFORMANCE

**Purpose.** Horizontal settlers are one of the most important elements in the technological scheme of water purification. Their use is associated with the possibility to pass a sufficiently large volume of water. The important task at the stage of their designing is evaluating of their effectiveness. Calculation of the efficiency of the settler can be made by mathematical modeling. Empirical, analytical models and techniques that are currently used to solve the problem, do not allow to take into account the shape of the sump and various design features that significantly affects the loyalty to a decision on the choice of the size of the settling tank and its design features. The use of analytical models is limited only to one-dimensional solutions, does not allow accounting for nonuniform velocity field of the flow in the settler. The use of advanced turbulence models for the calculation of the hydrodynamics in the settler complex forms now requires very powerful computers. In addition, the calculation of one variant of the settler may last for dozens of hours. The aim of the paper is to build a numerical model to evaluate the effectiveness of horizontal settling tank modified design. **Methodology.** Numerical models are based on: 1) equation of potential flow; 2) equation of inviscid fluid vortex flow; 3) equation of viscous fluid dynamics; 4) mass transfer equation. For numerical simulation the finite difference schemes are used. The numerical calculation is carried out on a rectangular grid. For the formation of the computational domain markers are used. **Findings.** The models allow calculating the clarification process in the settler with different form and different configuration of baffles. **Originality.** A new approach to investigate the mass transfer process in horizontal settler was proposed. This approach is based on the developed CFD models. Three fluid dynamics models were used for the numerical investigation of flows and waste waters purification. **Practical value.** The developed models have more capacity than the existing models in Ukraine. The developed models allow calculating quickly the efficiency of water purification in settlers. The models are not computationally expensive. Calculation time of one variant of the problem takes few seconds.

*Keywords:* CFD model; settlers; mass transfer; water purification

#### Introduction

It's known, that sedimentation by gravity is one of the most common approaches for the removal of suspended solid particles from water in water treatment plants. This physical process is used in settlers. The engineers know that the performance

of settlers would directly or indirectly affect the rest of water treatment process. The design of settlers with the high deposition rate is critical and has been the subject of many theoretical, experimental and numerical investigations [1, 6, 10, 11, 12, 13, 14].

Nowadays to receive more effective work of the horizontal settlers with comprehensive geomet-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

rical forms, different kinds of baffles and plates are proposed by designers. According to this the real lack of methods to calculate the efficiency of these settlers is an obvious problem.

To calculate the efficiency of horizontal settlers the empirical models are widely used in Ukraine [3, 15]. These models do not take into account the geometrical form of the horizontal settlers and the peculiarities of the sedimentation process. Therefore, it is important to develop CFD models having more capabilities to simulate the process of the waste waters treatment in settlers and which do not need much computational time for running and allow taking into account the geometrical form of settlers [1, 10, 9, 16].

### Purpose

The objective of this paper is the development of the effective computer models (CFD models) which are more effective than the employed in Ukraine models and which can be used for prediction of the horizontal settler efficiency.

### Methodology

*Mass transfer model.* To simulate the process of water purification in the horizontal settler the transport equation (1) is used [1, 7, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + \sigma C = \mu_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \mu_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (1)$$

where  $C$  is the concentration;  $u$ ,  $v$  are the velocity components in  $x$ ,  $y$  direction respectively;  $w$  – is the settling velocity;  $\sigma$  – is the parameter taking into account the process of flocculation and decay;  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  are the coefficients of turbulent diffusion in  $x$ ,  $y$  direction respectively;  $x_i$ ,  $y_i$  are the Cartesian coordinates;

The transport equation is used with the following boundary conditions [1, 5, 8, 10]:

– inlet boundary: , where  $C_E$  is the known concentration (in the case study of this paper it is dimensionless and equal to  $C_E = 100$ );

– outlet boundary: in numerical model the condition  $C(i+1, j) = C(i, j)$  is used. Here,  $C(i+1, j)$  is the concentration at the outlet boundary

cell (this boundary condition means that we neglect the process of diffusion at this plane).  $C(i, j)$  is the concentration in the previous cell.

*Initial Condition:*

$C=0$ , for  $t=0$  [13].

*Fluid Dynamic Models.* To simulate the flow in the horizontal settler three fluid dynamic models were used.

The governing equations of the first model are

1) Poisson equation for flow function [4, 8]:

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

2) Equation of the vorticity transfer [4, 8]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

where  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  is vorticity.

The components of the water flow velocity inside the settler are determined as follows:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$$

The initial and boundary conditions for these equations are shown in [4].

The governing equation of the second model is [1, 4, 6, 8]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

where  $P$  is the potential of flow. The boundary conditions for this equation are discussed in [4, 8].

The components of flow velocity inside the settler are calculated as follows [5]

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}$$

The governing equations of the third model (Navier – Stokes equations) are equation (5) and equation (6).

Equation (5) is Poisson equation for flow function [11, 12]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (5)$$

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Equation (6) describes vorticity transfer in fluid [8, 12]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

where  $\text{Re} = \frac{V_0 L}{\nu}$  is Reynolds number.

Boundary and initial conditions of this fluid dynamic model are discussed in [8].

*Flocculation modeling.*

To model the process of flocculation the following equation is used [12, 13]

$$\frac{dC}{dt} = K_B \cdot C \cdot G^2 - K_A \cdot C \cdot C_1 \cdot G,$$

where  $C$  is concentration of primary (large) particles;  $C_1$  – initial concentration;  $K_A$  – experimentally determined coefficient for floc aggregation;  $K_B$  – experimentally determined coefficient for floc break up;  $G$  – mean velocity gradient.

*Computation of settling velocity.*

To compute the settling velocity the following model is used [12, 14]

$$w = w_0 (e^{-K_1(c-c_{\min})} - e^{-K_2(c-c_{\min})})$$

where  $K_1, K_2$  are experimental constants [5, 12].

*Numerical solver.*

Numerical integration of governing equations is carried out using rectangular grid. The geometrical form of the horizontal settler in the numerical model is created using porosity technique (markers method) [1, 8].

To solve the equation of potential flow (4) Samarskii A. A. implicit difference scheme is used [8]. At the first step Laplace equation (4) is written in the following form

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

where  $\eta$  is the ghost time.

At the second step the time splitting procedure for equation (7) is used [8]

$$+ \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} &= \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \\ &+ \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \\ &+ \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Components of the velocity are calculated using expressions (10):

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}, \quad (10)$$

To start the numerical integration of equation (7) it is necessary to set the initial condition in the form  $P = P_0$  (for example  $P_0 = 0$ ).

To solve equation of the vorticity transfer (3) the two steps difference scheme is used [8]:

– at the first step of splitting the difference equation is

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ + \frac{v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}}{\Delta y} = 0; \end{aligned}$$

– at the second step of splitting the difference equation is

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ + \frac{v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} = 0. \end{aligned}$$

The unknown meaning of vorticity is obtained from these expressions using the explicit formulae of «running calculation».

To solve Poisson equation (2) the following difference scheme of splitting is used [8]:

– at the first step of splitting the difference equation is

$$\frac{\Psi_{ij}^{n+\frac{1}{4}} - \Psi_{ij}^n}{\Delta t} = \frac{\Psi_{ij}}{2};$$

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

– at the second step of splitting the difference equation is

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t} = -\frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Psi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - \frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Psi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2};$$

– at the third step of splitting the difference equation is

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} - \Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{\Psi_{i+1,j}^{n+\frac{3}{4}} - \Psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta x^2} + \frac{\Psi_{i,j+1}^{n+\frac{3}{4}} - \Psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta y^2};$$

– at the last step the difference equation is

$$\frac{\Psi_{ij}^{n+1} - \Psi_{ij}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta t} = \frac{\overline{\omega_{ij}}}{2},$$

where

$$\overline{\omega_{i,j}} = \frac{1}{4}(\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j+1} + \omega_{i-1,j-1} + \omega_{i,j-1}).$$

Velocity components are calculated using the following expressions

$$u_{i,j} = \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j}}{\Delta y}; v_{i,j} = -\frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}}{\Delta x}$$

To solve equation (6) the change triangle difference scheme is used [8]. First of all velocity components are written in the following form

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

$$v = v^+ + v^- = \frac{v + |v|}{2} + \frac{v - |v|}{2}. \quad (11)$$

After that the convective derivatives are approximated using the following expressions:

$$\frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^+ \omega = (u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial u^- \omega}{\partial x} \approx \Lambda_x^- \omega = (u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^+ \omega = (v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}) / \Delta y,$$

$$\frac{\partial v^- \omega}{\partial y} \approx \Lambda_y^- \omega = (v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}) / \Delta y.$$

The second order derivatives are written as following:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \approx L_{xx}^+ \omega - L_{xx}^- \omega =$$

$$= (-\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j}) / \Delta x^2 + (\omega_{i+1,j} - \omega_{i,j}) / \Delta x^2,$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \approx L_{yy}^+ \omega - L_{yy}^- \omega =$$

$$= (\omega_{i,j-1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2 + (\omega_{i,j+1} - \omega_{i,j}) / \Delta y^2,$$

The difference approximation of the equation (6) can be written as follows

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) (\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n) =$$

$$= \frac{1}{\text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \times$$

$$\times (\omega^{n+1} \xi + (1 - \xi) \omega^n)$$

or

$$(E + \Delta t \xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-) \omega^{n+1} -$$

$$- \frac{\Delta t}{\text{Re}} \xi (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \omega^{n+1} =$$

$$= (E - \Delta t (1 - \xi) (\Lambda_x^+ + \Lambda_x^- + \Lambda_y^+ + \Lambda_y^-)) \omega^n +$$

$$+ \frac{\Delta t}{\text{Re}} (1 - \xi) (L_{xx}^+ + L_{xx}^- + L_{yy}^+ + L_{yy}^-) \omega^n.$$

where  $\xi$  is parameter

If  $\xi = 1/2$  we have the difference scheme which has the second order of accuracy in time.

The change triangle difference scheme for equation of vorticity transfer is written as follows

$$\left( E + \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^+ + \Lambda_y^+) - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^+ + L_{yy}^+) \right) \omega^{n+\frac{1}{2}} =$$

$$= \left( E - \frac{\Delta t}{2} (\Lambda_x^- + \Lambda_y^-) + \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} (L_{xx}^- + L_{yy}^-) \right) \omega^n;$$

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

Using these expressions the unknown meaning of vorticity is computed using «running calculation» [8].

To solve the mass conservation equation (1) the implicit difference scheme of splitting is used [1, 8]. At first step the physical splitting of equation (1) is carried out:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u c}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)c}{\partial x} + \sigma c = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

At the second step the following approximation of the first order derivatives are used [5]:

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

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

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

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

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

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

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

The second order derivatives are approximated as following:

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

$$- \mu_{x_2} \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

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

$$- \mu_{y_2} \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}$$

Here we use notation  $v=v-w$ . In these formulas  $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, L_x^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-$ , etc. are the notations of the difference operators [8].

After the approximation the solution of the difference equation is splitted in 4 steps [1, 8]:

– at the first step  $k=1/4$  the difference equation is:

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

– at the second step  $k=n+1/2; c=n+1/4$  the difference equation is:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{2} C_{ij}^k = 0;$$

– at the third step  $k=n+\frac{3}{4}; c=n+\frac{1}{2}$  the difference equation is:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} = \\ = \frac{1}{2} \left( M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k \right);$$

– at the fourth step  $k=n+1; c=n+\frac{3}{4}$  the difference equation is:

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left( M_{xx}^- C_{xx}^k + M_{xx}^+ C_{xx}^c + M_{yy}^- C_{yy}^k + M_{yy}^+ C_{yy}^c \right).$$

The developed numerical models were coded using FORTRAN.

**Findings**

The developed computer models were used to compute water purification in the horizontal settlers with comprehensive geometrical forms, different kinds of baffles and plates:

Fig. 1. – horizontal settler with baffle and vertical plate;

Fig. 2. – horizontal settler with perforated baffle (a) and with water injection into the working part of settler (b);

Fig. 3. – horizontal settler with system of plates.

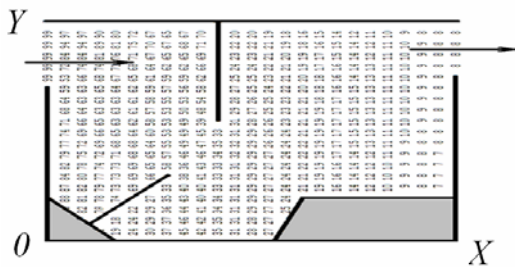


Fig. 1. Concentration field in the horizontal settler with baffle and vertical plate (inviscid vortex flow model)

In Fig. 1-3 the concentration field in the settlers is shown. The concentration is presented using «Integer» form of number. Every number shows the percentage of the concentration in the computational cell. The maximum concentration is at the inlet cell (it's equal to «99») and the smallest concentration is in the outlet cell. This concentration shows the efficiency of the each settler.

The computational time was 10 sec – 5 min to solve the fluid dynamics problems and mass transfer using the developed numerical models.

Results of numerical integration models equations described in Table 1

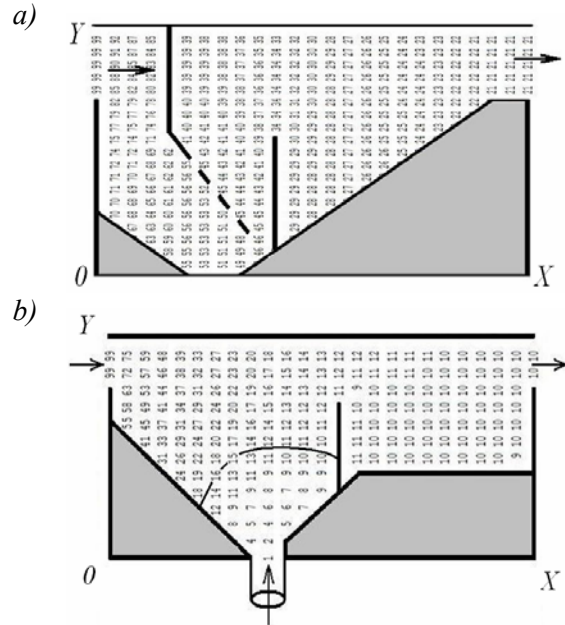


Fig. 2. Concentration field in the horizontal settler with: a) perforated baffle; b) baffle and water injection (model of potential flow)

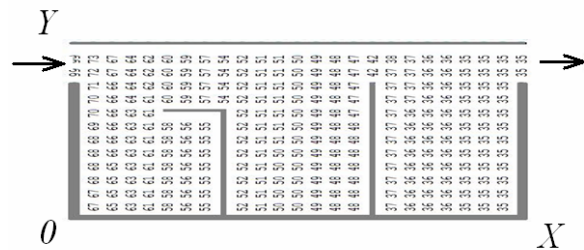


Fig. 3. Concentration field in the horizontal settler with system of plates (model of Navier-Stokes equations)

Table 1

Results of numerical experiment	
Settler	Efficiency
With baffle and vertical plate (Fig. 1)	92 %
With:	
a) perforated baffle;	79 %
b) baffle and water injection (Fig. 2)	90 %
With system of plates (Fig. 3)	65 %

### Originality and practical value

A new approach to investigate the mass transfer process in horizontal settler was proposed. This approach is based on the developed CFD models of different level. Three fluid dynamics models were used for the numerical investigation of flows in the settler. These models use the rectangular grid and porosity technique to create the form of the settler in the numerical model. The developed models have more capacity than the existing models in Ukraine. The developed models allow computing quickly the efficiency of water purification in settlers. The models are not computationally expensive.

### Conclusions

Three CFD models were developed to compute the flow field in horizontal settler. These models are based on the equations of inviscid fluid dynamics models and Navier-Stokes equations. The process of mass transfer in the horizontal settlers is simulated using convection-diffusing equation. Numerical study based on the developed models was carried out. Results illustrate that the developed models can be used to simulate the process of water purification for settlers having comprehensive geometrical form.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2012. – 112 с.
2. Василенко, О. А. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки : навч. посіб. / О. А. Василенко, С. М. Епоян. – Київ ; Харків : КНУБА : ХНУБА : ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.
3. Ласков, Ю. М. Примеры расчетов канализационных сооружений : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун. – Москва : Высш. шк., 1981. – 232 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1978. – 735 с.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Нагорная, Е. К. CFD-модель процесса массопереноса в вертикальном отстойнике / Е. К. Нагорная // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 39–50. doi: 10.15802/stp2013-/9578.
7. Русакова, Т. И. Исследование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в «уличных каньонах» города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 1 (55). – С. 23–34. doi: 10.15802/stp2015/38236.
8. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
9. A critical review of clarifier modeling: State-of-the-art and engineering practices / B. G. Plosz, I. Nopens, L. Rieger, A. Griborio [et al.] // Proc. 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modeling Seminar (26.02-28.02.2012). – Mont-Sainte-Anne, Quebec, 2012. – P. 27–30.
10. Biliaiev, M. M. New codes for the CFD simulation of the water purification in the horizontal settler / M. M. Biliaiev, V. A. Kozachyna // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2014. – Вип. 24. – С. 16–23.
11. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants / K. Ramalingam, S. Xanthos, M. Gong [et al.] // Water Science & Technology. – 2012. – Vol. 65. – Iss. 6. – P. 1087–1094. doi: 10.2166/wst.2012.944.
12. Griborio, A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach / A. Griborio. – USA : University of New Orleans, 2004. – 440 p.
13. Kleine, D. Finite Element Analysis of Flows in Secondary Settling Tanks / D. Kleine, B. D. Reddy // Intern. J. for Numerical Methods in Engineering. – 2005. – Vol. 64. – Iss. 7. – P. 849–876. doi: 10.1002/nme.1373.
14. Takács, I. Experiments in Activated Sludge Modelling / I. Takács. – Belgium : Ghent University, 2008. – 267 p.
15. Tamayol, A. Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian-Lagrangian Method / A. Tamayol, B. Firoozabadi, G. Ahmadi // J. of Applied Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 1, № 1. – P. 43–54.
16. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks / M. Shahrokhi, Md Azlin Md Said, F. Rostami, Syafalni // 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Environmental Science and Technology. – 2011. – Vol. 5. – P. V2-392–V2-396.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта kozachynav@yandex.ua, ORCID 0000-0002-6894-5532

## ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК РОБОТИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВІДСТІЙНИКІВ

**Мета.** Горизонтальні відстійники є одним із найважливіших елементів у технологічній схемі очищення води. Їх застосування пов'язано з можливістю пропуску досить великих обсягів води. При реконструкції або проектуванні горизонтальних відстійників виникає відповідальне завдання щодо оцінки їх ефективності. Розрахунок ефективності відстійника може бути виконаний методом математичного моделювання. Емпіричні, аналітичні моделі та методики, які на даний час використовуються для розв'язання поставленої задачі, не дозволяють врахувати форму відстійника та різні конструктивні особливості, що значно впливає на вірність прийняття рішення щодо вибору розмірів відстійника та його конструктивних особливостей. Використання аналітичних моделей обмежено лише одновимірними розв'язками, що не дозволяє врахувати нерівномірне поле швидкості потоку у відстійнику. Використання сучасних моделей турбулентності для розрахунку гідродинаміки у відстійнику складної форми потребує в даний час дуже потужних комп'ютерів. Крім цього, розрахунок одного варіанту відстійника може тривати десятки годин. У даній роботі розглянуто побудову чисельних моделей для оцінки ефективності роботи горизонтального відстійника модифікованої конструкції. **Методика.** В основу моделей покладено: 1) потенціальний рух ідеальної рідини; 2) вихровий рух ідеальної рідини; 3) вихровий рух реальної рідини (рівняння Нав'є-Стокса); 4) рівняння масопереносу. Для чисельного розв'язання рівнянь використовуються різницеві схеми. Чисельний розрахунок здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для формування виду розрахункової області та виділення її особливостей застосовується метод маркування. **Результати.** Розроблені чисельні моделі дозволяють розрахувати процес освітлення води в горизонтальних відстійниках різної форми та з різними конфігураціями пластин. **Наукова новизна.** Представлено новий підхід у дослідженні та розрахунку роботи горизонтальних відстійників різної конфігурації. Даний підхід ґрунтується на чисельному інтегруванні рівнянь руху рідини та масопереносу домішки. **Практична значимість.** Розроблені чисельні моделі розрахунку роботи горизонтальних відстійників пред'являють невеликі вимоги до потужності комп'ютерної техніки. Час розрахунку одного варіанта завдання становить кілька секунд.

*Ключові слова:* чисельна модель; горизонтальний відстійник; очистка води

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта kozachynav@yandex.ua, ORCID 0000-0002-6894-5532

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОТСТОЙНИКОВ

**Цель.** Горизонтальные отстойники являются одним из важнейших элементов в технологической схеме очистки воды. Их применение связано с возможностью пропуску достаточно больших объемов воды. При реконструкции или проектировании горизонтальных отстойников возникает ответственная задача по оценке их эффективности. Расчет эффективности отстойника может быть выполнен методом математического моделирования. Эмпирические, аналитические модели и методики, которые в настоящее время используются для решения поставленной задачи, не позволяют учесть форму отстойника и различные конст-



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

руктивные особенности, что значительно влияет на верность принятия решения по выбору размеров отстойника и его конструктивных особенностей. Использование аналитических моделей ограничено только одномерными решениями, не позволяет учесть неравномерное поле скорости потока в отстойнике. Использование современных моделей турбулентности для расчета гидродинамики в отстойнике сложной формы требует в настоящее время очень мощных компьютеров. Кроме этого, расчет одного варианта отстойника может продолжаться десятки часов. Целью работы является построение численной модели для оценки эффективности горизонтального отстойника модифицированной конструкции. **Методика.** В основу моделей положено: 1) потенциальное движения идеальной жидкости; 2) вихревое движение идеальной жидкости; 3) вихревое движение реальной жидкости (уравнения Навье-Стокса); 4) уравнение массопереноса. Для численного решения моделирующих уравнений используются разностные схемы. Численный расчет осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Для формирования вида расчетной области и выделения ее особенностей применяется метод маркирования. **Результаты.** Разработанные численные модели позволяют рассчитать процесс осветления воды в горизонтальных отстойниках различной формы и с различными конфигурациями пластин. **Научная новизна.** Представлен новый подход в исследовании и расчете работы горизонтальных отстойников различной конфигурации. Данный подход основывается на численном интегрировании уравнений движения жидкости и массопереноса примеси. **Практическая значимость.** Разработанные численные модели расчета работы горизонтальных отстойников предъявляют небольшие требования к мощности компьютерной техники. Время расчета одного варианта задачи составляет несколько секунд.

*Ключевые слова:* численная модель; горизонтальный отстойник; очистка воды

## REFERENCES

1. Belyayev N.N., Nagornaya Ye.K. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya* [Mathematical modeling of mass transfer in sedimentation tanks of sewage systems]. Dnipropetrovsk, Nova Ideolohiia Publ., 2012. 112 p.
2. Vasylenko O.A., Epoian S.M. *Vodovidvedennia ta ochystka stichnykh vod mista. Kursove i dyplomne proektuvannia. Pryklady ta rozrakhunky* [Water drain and wastewater treatment for the town. Course and degree designing. Examples and calculations]. Kyiv, Kharkiv, KNUCA, KAUCA, TO Ekskluzyv Publ., 2012. 540 p.
3. Laskov Yu.M., Voronov Yu.V., Kalitsun V.I. *Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy* [The examples of calculations of sewer facilities]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1981. 232 p.
4. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 735 p.
5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environment problems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
6. Nagornaya Ye.K. CFD-model protsessa massoperenosa v vertikalnom otstoynike [CFD-model of the mass transfer in the vertical settler]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 39-50. doi: 10.15802/stp2013/9578.
7. Rusakova, T. I. Issledovaniye zagryazneniya atmosfernogo vozdukh vybrosami avtotransporta v «ulichnykh kanonakh» goroda [Research of air pollution from traffic in «street canyons» of city]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 1 (55), pp. 23-34. doi: 10.15802/stp2015/38236.
8. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution in the environment]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1997. 368 p.
9. Plosz B.G., Nopens I., Rieger L., Griborio A., De Clercq J., Vanrolleghem P.A., Daigger G.T., Takacs I., Wicks J., Ekama G.A. A critical review of clarifier modeling: State-of-the-art and engineering practices. Proc. 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modeling Seminar (26.02-28.02. 2012), Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada, 2012, pp. 27-30.
10. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A. New codes for the CFD simulation of the water purification in the horizontal settler. *Problemy vodopostachanniya, vodovidvedenniya ta hidravliki* [Problems of water supply, wooden and hydraulics], 2014, issue 24, pp. 16-23.
11. Ramalingam K., Xanthos S., Gong M., Fillos J., Beckmann K., Deur A. McCorquodale J.A. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- treatment plants. *Water Science & Technology*, 2012, vol. 65, issue 6, pp. 1087-1094. doi: 10.2166/wst.2012.944.
12. Griborio A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. USA, University of New Orleans, 2004. 440 p.
  13. Kleine D., Reddy B.D. Finite Element Analysis of Flows in Secondary Settling Tanks. *Intern. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, vol. 64, issue 7, pp. 849-876. doi: 10.1002/nme.1373.
  14. Takács I. Experiments in Activated Sludge Modelling. Belgium, Ghent University Publ., 2008. 267 p.
  15. Tamayol A., Firoozabadi B., Ahmadi G. Determination of Settling Tanks Performance Using an Eulerian-Lagrangian Method. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 43-54.
  16. Shahrokhi M., Said Md Azlin Md, Rostami F., Syafalni. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Environmental Science and Technology, 2011, vol. 5, pp. 392-396.

*Prof. S. O. Pichugov, D. Sci. (Phys.–Math.), (Ukraine); Prof. O. H. Goman, D. Sci. (Phys.–Math.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Received: June 15, 2015

Accepted: Aug. 14, 2015