

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 628.334.5:519.6

Е. К. НАГОРНАЯ^{1*}

^{1*}Каф. «Гидравлики», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24^а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (066)752 13 32, эл. почта ek_n@i.ua

CFD-МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

Цель. В настоящее время в мире активно развивается научное направление по созданию теоретических методов расчета канализационных отстойников. На практике инженеры используют, как правило, балансовые модели и одномерные кинематические модели. Данные модели не учитывают гидродинамику потока внутри отстойника и его сложную геометрическую форму. Это является существенным препятствием на пути широкого применения уравнений Навье-Стокса в повседневной практике проектирования. Применение CFD-моделей, основанных на решении уравнений Навье-Стокса требует применения очень мелкой сетки, что приводит к существенным затратам компьютерного времени на получение прогнозных данных. С этой целью необходимым является создание эффективной CFD-модели для исследования процесса очистки сточных вод в вертикальных отстойниках с учетом их геометрической формы и конструктивных особенностей. **Методика.** Применяются разностные схемы расщепления, реализуемые методом бегущего счета. **Результаты.** Разработана 2-D-CFD модель, позволяющая в течение нескольких секунд выполнить расчет вертикального отстойника с учетом его геометрической формы, наличия центральной трубы, ее параметров, наличия рассекателя перед выходом из трубы. Применение в построенной модели метода маркирования расчетной области дает возможность выполнять прямое численное моделирование гидродинамики течения и массопереноса в отстойниках без ограничения на их форму. **Научная новизна.** Создание CFD-моделей, позволяющих, с одной стороны учесть геометрическую форму отстойника, основные физические процессы массопереноса в сооружении, а с другой стороны – требующих небольших затрат времени на получение результатов. **Практическая значимость.** Разработанная CFD-модель и построенный на ее основе код позволяют, при малых затратах компьютерного времени – примерно таких же, как и при расчете одномерной модели, решать сложные многопараметрические задачи, возникающие на этапе проектирования вертикальных отстойников с учетом их формы и конструктивных особенностей.

Ключевые слова: вертикальный отстойник; CFD-модель; численное моделирование; массоперенос

Введение

Отстойники систем водоотведения являются одним из важнейших элементов в системе сооружений для очистки сточных вод. Данные сооружения определяют, в значительной степени, эффективность функционирования комплекса очистных сооружений в целом. Кроме этого, необходимо учитывать, что после вто-

ричных отстойников сточные воды, содержащие определенную долю взвешенных веществ, сбрасываются в водоем. Поэтому обеспечение эффективной очистки воды на вторичных отстойниках является важнейшим средством защиты поверхностных вод от загрязнения взвешенными веществами.

При разработке систем очистки воды для малых предприятий в настоящее время широко применяются вертикальные отстойники.

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТІ

Оценка эффективности работы этих отстойников на стадии проектирования комплекса очистных сооружений – сложная и ответственная задача. Оперативное решение этой задачи, когда рассматриваются различные варианты отстойников, варьируется их конструкция, габариты и т.п., возможно расчетным путем – на основе метода математического моделирования [1-3]. К настоящему времени, большинство прикладных методов расчета вертикальных отстойников базируется на применении одномерных кинематических моделей транспорта-загрязнителя в отстойниках или на применении нуль-мерных (балансовых) моделей. Эти модели не позволяют учитывать гидравлический режим работы отстойника и его геометрическую форму. Поэтому актуальной задачей является создание математических моделей работы вертикальных отстойников, которые позволяли бы проектировщику оперативно получать необходимую информацию с учетом формы очистных сооружений, особенностей массопереноса, режима их работы.

Анализ публикаций

На практике, при проектировании отстойников, инженеры, в основном, используют балансовые модели [4, 11-13] и одномерные кинематические модели [8, 10, 14-16, 18-20]. Балансовые модели позволяют оперативно рассчитать эффективность очистки воды в сооружении, но обладают рядом ограничений:

- модели являются нуль-мерными;
- геометрическая форма отстойника в моделях не учитывается;
- место подвода сточных вод в отстойник и отвода из него сточных вод в моделях не учитываются;
- скорость движения потока в отстойнике и ее изменение внутри сооружения – не учитываются;
- в моделях нет учета процесса диффузии.

Математические модели отстойников, основанные на решении 1-D уравнения переноса загрязнителя, позволяют увеличить возможности проектировщиков за счет учета тех факторов, которые не учитываются в 0-D моделях. Активное развитие одномерных моделей связано с совокупностью ряда обстоятельств:

- эти модели учитывают такие важные факторы, как конвекция, диффузия;

- построение данных моделей значительно проще, чем построение двухмерных или трехмерных CFD-моделей;

- разработка кода (программы) для численного интегрирования одномерного кинематического уравнения переноса – проще, чем для реализации 2-D или 3-D численной модели;

- расчет на базе одномерных моделей не требует больших затрат компьютерного времени;

- не требуется много времени на формирование вида расчетной области и для построения расчетной сетки;

- невысокая стоимость расчета, что важно при проведении серийных расчетов на практике.

Следует подчеркнуть, что, в целом, одномерные модели имеют такие ограничения:

- нет учета неравномерного поля скорости потока в отстойнике;

- нет учета реальной геометрической формы отстойника и различных его внутренних конструктивных особенностей;

- в одномерных моделях полагается, что в любом горизонтальном сечении отстойника поле концентрации загрязнителя – однородно;

- при расчете отстойника гидродинамическая задача не решается, и расчет проводится по заданному значению скорости;

- при использовании 1-D модели на этапе проектирования отстойника необходимо обоснование длины каждой расчетной зоны (зона осаждения и т.д.), для которой используется уравнение транспорта загрязнителя; длина этих зон может варьироваться, если отстойник будет иметь размеры, форму, отличную от традиционных;

- в модели нет учета «переходных» областей, располагающихся между расчетными зонами;

- модель не может учесть, что возле дна происходит разворот потока.

Применение CFD-моделей, основанных на решении уравнений динамики жидкости позволяет качественно, на новом уровне осуществлять моделирование процесса осаждения в отстойнике [17, 21, 22, 24]. Но следует отметить, что при использовании модели вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса) необходима очень мелкая сетка, что приводит к существенным затратам компьютерного времени на получение прогнозных данных. Это является существенным

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

препятствием на пути широкого применения уравнений Навье-Стокса в практике проектирования. Кроме этого, требуется обоснованный выбор модели турбулентности для рассматриваемого класса течений. Здесь важно отметить, что применение 3-D-CFD математических моделей, основанных на модели вязкой жидкости, является также весьма затратным при практическом использовании [23]. Поэтому актуальной задачей является создание CFD-моделей, позволяющих, с одной стороны учесть геометрическую форму отстойника, основные физические процессы переноса, а с другой стороны – требующих небольших затрат времени на получение результатов.

Цель данной работы – разработка 2-D численной модели массопереноса в вертикальном отстойнике, позволяющей учесть при моделировании геометрическую форму отстойника и выполнить расчет поля скорости и процесса массопереноса в отстойнике.

Математическая модель процесса массопереноса в вертикальном отстойнике

Для расчета процесса переноса загрязнителя в вертикальном отстойнике используется уравнение массопереноса, усредненное по ширине сооружения [7]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + kC = \text{div}(\mu \text{grad}C), \quad (1)$$

где C – концентрация загрязнителя в сточной воде;

u, v – компоненты вектора скорости течения;

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии;

w – скорость оседания загрязнителя;

t – время;

k – коэффициент, учитывающий процессы биохимического окисления в отстойнике.

Для уравнения переноса (1) ставятся следующие граничные условия. На твердых границах (контур отстойника, центральная труба, различные препятствия внутри него) реализуется граничное условие вида:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали к

твердой поверхности.

На входной границе (граница входа потока сточных вод в отстойник) ставится условие:

$$C_{\text{граница}} = C_E,$$

где C_E – известное значение концентрации загрязнителя.

На выходной границе расчетной области, в численной модели ставится «циклическое» (мягкое) граничное условие вида:

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

где $i+1, j$ – номер разностной ячейки на выходе из расчетной области (отстойника).

В начальный момент времени полагается $C=0$ в расчетной области. Задача транспорта загрязнителя в отстойнике решается на установление решения. На нижней границе сооружения реализуется условие «выпадения» загрязнителя из потока сточных вод со скоростью w . То есть загрязнитель, достигнув нижней поверхности отстойника, «уходит» из раствора.

Гидродинамическая модель

Для решения уравнения массопереноса в отстойнике необходимо рассчитать поле скорости потока внутри сооружения. Важно подчеркнуть, что составляющие u, v вектора скорости потока сточных вод, входящие в уравнение (1) должны удовлетворять уравнению неразрывности. Для решения этой гидродинамической задачи в данной работе используется 2-D модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид [6]:

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

где P – потенциал скорости.

Для данного уравнения ставятся следующие граничные условия [6]:

– на твердых стенках отстойника, трубе внутри него: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали к твердой границе;

– на входной границе (область втекания сточных вод в отстойник): $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n –

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

известное значение скорости втекания;

– на выходной границе расчетной области (область выхода осветленных вод из отстойника) $P = P_0 + const$ (условие Дирихле).

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент-вектора скорости потока сточных вод на основе известных зависимостей [9]

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

Рассчитанное значение компонент вектора скорости потока сточных вод используется на следующем этапе моделирования для решения задачи массопереноса загрязнителя в отстойнике.

Численный метод решения

Численное интегрирование уравнений модели проводится с помощью метода конечных разностей на прямоугольной разностной сетке. Потенциал скорости, концентрация загрязнителя определяются в центре разностных ячеек, а компоненты вектора скорости течения – на сторонах разностных ячеек.

Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод установления решения по времени. Поэтому, численно интегрируется уравнение эволюционного вида:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где t – фиктивное время.

При $t \rightarrow \infty$ решение уравнения (3) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (2).

Для численного интегрирования уравнения (3) используется неявная схема суммарной аппроксимации [9]. В этом случае разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

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

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

Отметим, что значение потенциала скорости $P_{i,j}$ в центре каждой разностной ячейки, на каждом шаге расщепления данной разностной схемы, определяется по явной формуле – методу бегущего счета [9].

Для реализации, на твердых стенках, граничного условия $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ (n – единичный вектор внешней нормали к стенке) в численной модели используются фиктивные разностные ячейки. Для начала расчета по методу Либмана необходимо задать «начальное» значение потенциала скорости в расчетной области, например: $P_{i,j} = 0$. При проведении серийных расчетов поле потенциала скорости, определенное численным путем для одной задачи, может использоваться как «начальное» при расчете последующей, с целью минимизации компьютерного времени при расчете. Расчет прекращается при выполнении условия:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (4)$$

где ε – малое число (например, $\varepsilon = 0,001$);

n – номер итерации.

После определения поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент-вектора скорости по формулам:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (5)$$

При решении эволюционного уравнения (3) задается поле потенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени.

Для численного интегрирования уравнения Лапласа также используется метод Либмана [9]. В этом случае аппроксимирующее уравнение имеет вид:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

Тогда неизвестное значение потенциала в центре разностной ячейки определяется так:

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

где $A = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

В разработанном коде расчет по методу Либмана реализован в отдельной подпрограмме.

Для численного интегрирования уравнения транспорта загрязнителя в отстойнике используется попеременно – треугольная неявная разностная схема [5]. Данная разностная схема основывается на расщеплении исходного дифференциального уравнения. Разностные соотношения данной схемы, для каждого шага расщепления, в операторном виде записываются так [5]:

на первом шаге расщепления: $k = n + \frac{1}{4}$

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) &= \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n); \end{aligned}$$

на втором шаге расщепления: $k = n + \frac{1}{2}$;

$c = n + \frac{1}{4}$;

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) &= \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c); \end{aligned}$$

на третьем шаге расщепления: $k = n + \frac{3}{4}$;

$c = n + \frac{1}{2}$;

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^- C^k) &= \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c); \end{aligned}$$

на четвертом шаге расщепления: $k = n + 1$;

$c = n + \frac{3}{4}$;

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^+ C^k) &= \\ &= \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k). \end{aligned}$$

В данных выражениях использованы следующие обозначения разностных операторов:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Подробное пояснение к данным разностным операторам представлено в работе [5]. Незвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной формуле «бегущего счета». Рассмотренная разностная схема расщепления является абсолютно устойчивой на каждом шаге расщепления и обладает свойством консервативности – что крайне важно при решении задач массопереноса [7].

На пятом расчетном шаге рассчитывается изменение концентрации загрязнителя за счет его гравитационного оседания по следующей формуле:

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} - w \frac{C_{i,j+1}^n - w C_{i,j}^n}{\Delta y} = 0.$$

Расчетные зависимости на каждом шаге расщепления реализованы в разработанном коде в виде отдельной подпрограммы.

На базе построенной CFD-модели создан код «**Settler-2**». Для программирования использовался FORTRAN. Верификация разработанной CFD-модели проведена на примере решения комплекса тестовых задач, имеющих точное (аналитическое) решение, изученных экспериментально или решенных другими исследователями с помощью иных численных методов.

Формирование вида расчетной области

Необходимо отметить, что расчет массопереноса в вертикальных отстойниках проводится в области сложной геометрической формы, что крайне усложняет процесс построения численной модели сооружения. В данной работе формирование геометрической формы отстойника на прямоугольной разностной сетке осуществляется с помощью метода маркирования [5]. Это дает возможность быстро формировать любую геометрическую форму отстойника в файле исходных данных, без каких либо ограничений на ее вид, и, что крайне важно – не вносить ни каких изменений в расчетный код.

Алгоритм решения задачи транспорта загрязнителя в вертикальном отстойнике

Решение задачи о транспорте загрязнителя в отстойнике осуществляется в такой последовательности:

1. Пользователь вносит исходную информацию в файл начальных данных (файл типа DAT) об очистном сооружении: геометрическую форму отстойника, его размеры, положение отверстий для входа и выхода сточных вод, положение центральной трубы или других элементов сооружения, концентрацию загрязнителя в потоке сточных вод, поступающих в отстойник и т.д. Формирование вида расчетной области осуществляется с помощью маркеров. Пользователь также может корректировать размер разностной сетки.

2. Осуществляется запуск подпрограммы численного интегрирования уравнения для по-

тенциала скорости. На печать выдается поле потенциала скорости через определенное число выполненных интеграций. Компьютерная программа осуществляет контроль процедуры расчета потенциала скорости и останавливает данный расчет, если выполняется условие вида (4). Осуществляется вывод на печать поля потенциала скорости.

3. Выполняется расчет компонент-вектора скорости потока сточных вод в отстойнике по зависимостям вида (5).

4. Осуществляется запуск подпрограмм численного интегрирования уравнения транспорта загрязнителя в отстойнике. На печать выдается поле концентрации загрязнителя в отстойнике через заданное число шагов по времени.

5. Результаты моделирования заносятся в файл расчетных данных типа DAT.

6. Осуществляется анализ поля концентрации загрязнителя в отстойнике и, в первую очередь – на выходе из него, т.к. именно данная информация определяет эффективность работы очистного сооружения.

7. При необходимости, пользователь вносит корректировку в файл начальных данных (например, изменяет длину центральной трубы, меняет место водослива и т.п.) и расчет повторяется.

Основные шаги разработанного алгоритма (на примере решения 3D-задачи) показаны на блок-схеме (рис. 1).

Осуществляя, таким образом, перебор (расчет) различных вариантов конструкции отстойника, пользователь может определить наиболее рациональный вариант для конкретных условий. Учитывая, что для расчета отстойника, на базе построенной CFD-модели, требуется малое время (порядка нескольких секунд), то для выбора оптимального варианта сооружения потребуется небольшой промежуток времени, приемлемый для проектировщика.

Практическая реализация модели

Результаты практической реализации построенной CFD-модели представлены ниже. Рассматривалось моделирование процесса массопереноса в вертикальном отстойнике с центральной трубой. Схема сооружения показана на рис. 1. Вблизи выхода из трубы расположен рассекающий (на рис. 1 – это треугольник). Вы-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ход из отстойника условно обозначен буквами **R** (правый) и **L** (левый). Вычислительный эксперимент проводился при таких параметрах: скорость потока на входе в отстойник 21,7 м/ч и 11 м/ч; коэффициент диффузии 0,7 м²/ч. Значение скорости осаждения загрязнителя составляет: $w=2,5$ м/ч и $w=1,6$ м/ч; коэффициент биохимического окисления $k=0$; длина отстойника 8 м; глубина 3,6 м. Концентрация загрязнителя во входящем в отстойник потоке равна 100 ед (в безразмерном виде).

Цель моделирования – оценка эффективности очистки сточных вод в отстойнике при заданных исходных данных.

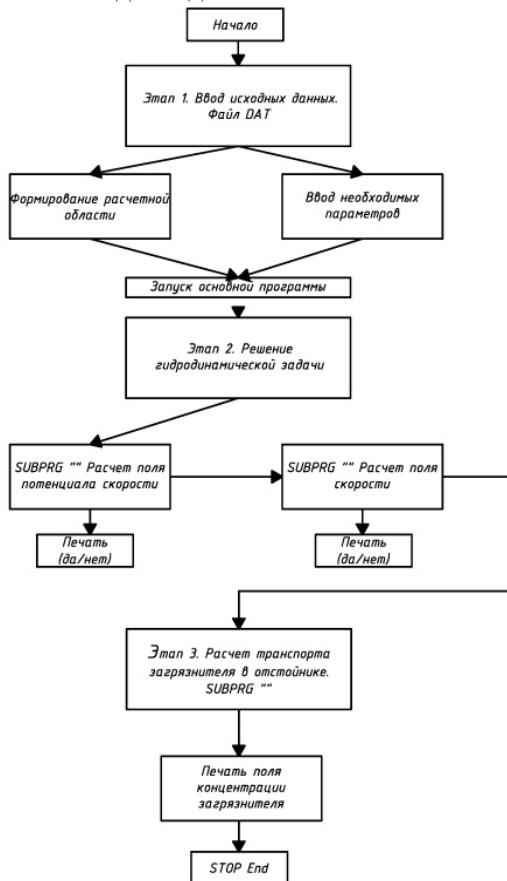


Рис. 1. Основные этапы алгоритма решения задачи о транспорте-загрязнителе в отстойнике

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На рис. 2–4 – представлены расчетные значения концентрации загрязнителя в отстойнике при различном значении скорости входа потока сточных вод в отстойник и различной скорости оседания загрязнителя. На этих рисунках значение концентрации показано

в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины входной концентрации. Здесь необходимо отметить, что вывод на печать результатов расчета на данных рисунках осуществлялся по формату печати «целых» чисел, т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «7,36 %» от концентрации на входе в отстойник, то на печать будет выведено «7». Аналогично, если значение концентрации менее 1 %, то на печать выдается «0». Выбор такого подхода объясняется тем, что он дает возможность быстро анализировать эффективности очистки воды в любой зоне отстойника. В разработанном коде, при проведении расчетов, параллельно, на печать выдается значение концентрации по формату «действительных» чисел в любой интересующей зоне сооружения.

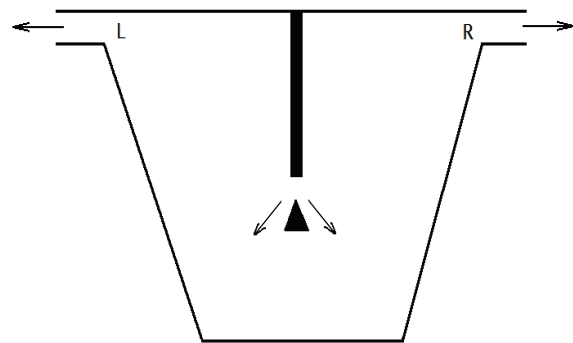


Рис. 2. Схема вертикального отстойника с центральной трубой

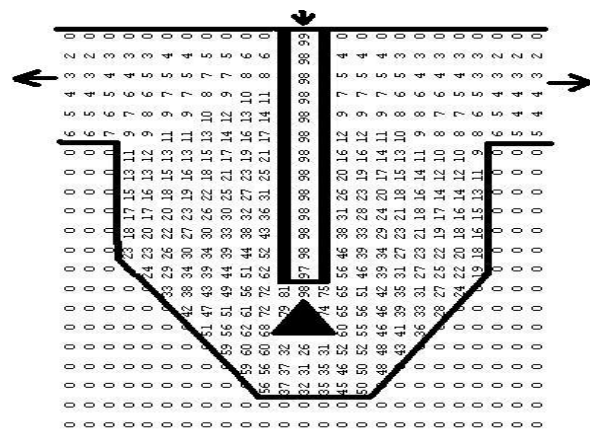


Рис. 3. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с центральной трубой

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Величина концентрации загрязнителя на выходе из отстойника составляет:

– при скорости осаждения $w=2,5$ м/ч и скорости входа 21,7 м/ч: на правом выходе 2–5 %, на левом – 2–6 %;

– при скорости осаждения $w=1,6$ м/ч и скорости входа 21,7 м/ч: на правом выходе 10–16 %, на левом – 12–21 %;

– при скорости осаждения $w=1,6$ м/ч и скорости входа 11 м/ч: на правом выходе 3–7 %, на левом – 3–5 %.

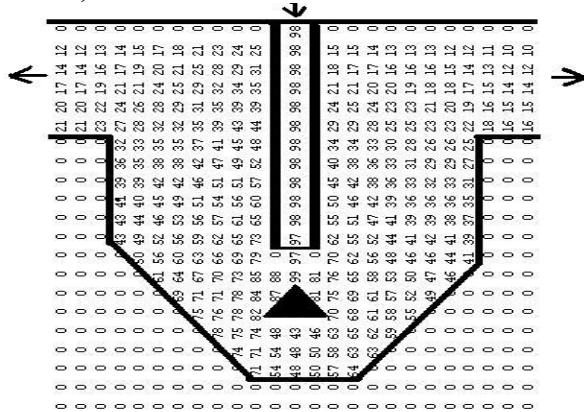


Рис. 4. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с вертикальной перегородкой и вертикальной пластиной (длина вертикальной перегородки 2,4 м, длина вертикальной пластины 0,8 м, $w=0,02$ м/ч)

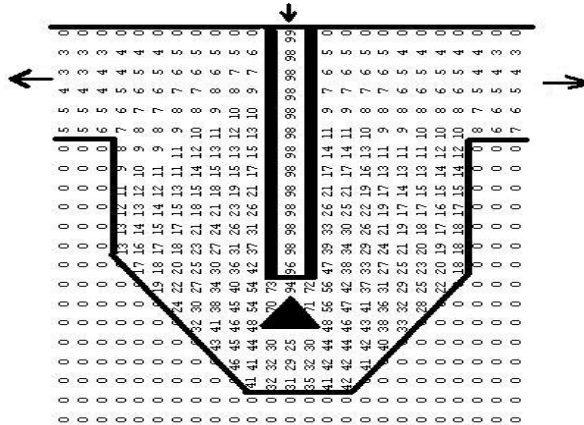


Рис. 5. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с горизонтальной и горизонтальной пластинами (длина вертикальной перегородки 2,4 м, длина горизонтальной пластины 1,08 м, длина вертикальной пластины 0,8 м, $w=0,2$ м/ч)

Как и следовало ожидать – уменьшение величины скорости осаждения загрязнителя при-

водит к снижению эффективности очистки воды в отстойнике.

В заключение отметим, что для расчета варианта задачи потребовалось 5 с компьютерного времени.

Выводы

В работе приведена эффективная CFD-модель для исследования процесса массопереноса в канализационных вертикальных отстойниках сложной геометрической формы. Разработанный код позволяет, при малых затратах времени, решать сложные многопараметрические задачи, возникающие на этапе проектирования вертикальных отстойников. Дальнейшее направление данной работы следует проводить в направлении создания трехмерной модели процесса массопереноса в отстойниках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. 3D расчет вертикального отстойника на базе CFD модели [Электронный ресурс] / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная // Наук. пр. Вінницького нац. техн. ун-ту. – Вінниця, 2012. – № 3. – С. 1–10. – Режим доступа http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2012_3/2012-3.htm. – Загл. с экрана.
2. Беляев, Н. Н. К расчету процесса массопереноса в вертикальном отстойнике / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – 2012. – № 3 (9). – С. 32–40.
3. Беляев, Н. Н. Моделирование процесса массопереноса с учетом энергоэффективности в вертикальном отстойнике / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная, П. В. Хорсев, С. С. Тищенко // Энергобережения в будівництві та архітектурі: науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, 2012. – Вип. 3. – С. 114–120.
4. Давыдов, Е. И. Исследование и расчет вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой / Е. И. Давыдов, Б. Ф. Лямаев // Инженерно-строительный журнал. – М., 2011. – № 5. – С. 10–15.
5. Згуровский, М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 735 с.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
8. Олейник, А. Я. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод / Я. А. Олейник, Ю. И. Калугин, Н. Г. Степовая, С. М. Зябликов // Прикладна гідромеханіка. – К., 2004. – № 4. – С. 62–67.
9. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
10. Степова, Н. Г. До розрахунку вертикального відстійника з врахуванням форми його нижньої частини / Н. Г. Степова, Ю. І. Калугін, О. Я. Олійник // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2010. – № 14. – С. 145–151.
11. Таварткиладзе, И. М. Математическая модель расчета вертикальных отстойников с перегородкой / И. М. Таварткиладзе, А. М. Кравчук, О. М. Нечипор // Водоснабжение и санитарная техника. – М., 2006. – № 1, ч. 2. – С. 39–42.
12. Al-Qudah, O. M. Sedimentation Tank Simulation Design and Application in Wadi Al-Arab WWTP (Jordan) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://utminers.utep.edu/omal/design%20report1.htm>. – Загл. с экрана.
13. Bürger, R. A consistent modeling methodology for secondary settling tanks in wastewater treatment / R. Bürger, S. Diehl, I. Nopens // Water Research. – 2011. – № 45(6). – P. 2247–2260.
14. Holenda, B. Development of modeling, control and optimization tools for the activated sludge process : thesis... Ph.D. / B. Holenda ; Doctorate School of Chemical Engineering University of Pannonia. – Pannonia, 2007. – 155 p.
15. Holenda, B. Comparison of one-dimensional secondary settling tank models [Electronic resource] / B. Holenda, I. Pasztor, A. Karpati, A. Redey // E-Water Official Publication of the European Water Association (EWA), EWA. – 2006. – 17 p. Режим доступа: http://www.ewaonline.de/journal/2006_06.pdf. – Загл. с экрана.
16. David, R. Classical Models of Secondary Settlers Revisited / R. David, A. VandeWouwer, P. Saucez, J.-L. Vassel // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 2006) and 9th International Symposium on Process Systems Engineering. – Belgium, 2006. – P. 677–682.
17. Griborio, A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach : diss. ... Dr. of Philosophy in The Engineering and Applied Sciences Program / A. Griborio ; University of New Orleans. – USA, 2004. – 440 p.
18. Plosz, B. G. A critical review of clarifier modeling: State-of-the-art and engineering practices / B. G. Plosz, I. Nopens, L. Rieger, A. Griborio, J. De Clercq, P. A. Vanrolleghem, G. T. Daigger, I. Takacs, J. Wicks, G. A. Ekama // IWA/WEF Wastewater Treatment : proceedings of the 3rd Modeling Seminar, (February 26-28. 2012 year). – Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada, 2012. – P. 27–30.
19. Plosz, B. G. Shall we upgrade one-dimensional secondary settler models used in WWTP simulators? – An assessment of model structure uncertainty and its propagation / B. G. Plosz, J. De Clercq, I. Nopens, L. Benedetti, P. A. Vanrolleghem // Water Science and Technology. – 2011. – № 63 (8). – P. 1726–1738.
20. Ramin, E. Significance of uncertainties derived from settling tank model structure and parameters on predicting WWTP performance – A global sensitivity analysis study / E. Ramin, G. Sin, P.S. Mikkelsen, B. G. Plosz // Systems Analysis and Integrated Assessment : proceedings of the 8th IWA Symposium (Watermatex 2011). – Spain, San Sebastian, 2011. – P. 476–483.
21. Schamber, D. R. Numerical analysis of flow in sedimentation basins / D. R. Schamber, B. E. Larock // Journal Hydraulic Division. – 1981. – P. 595–591.
22. Shahrokhi, M. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks / M. Shahrokhi, F. Rostami, Md Azlin Md Said, Syafalni // Environmental Science and Technology : proceedings of the 2nd International Conference (February 26-28. 2011 year). – Singapore, 2011. – Vol. 6. – P. V2-392–V2-396.
23. Shaw, A. Optimizing Energy Dissipating Inlet (Edi) Design In Clarifiers Using An Innovative CFD Tool / A. Shaw, S. McGuffie, C. Wallis-Lage, J. Barnard // Water Environment Federation (WEFTEC). – 2005. – P. 8719–8736.
24. Stamou, A. I. Design of two-storey final settling tanks using mathematical models / A. I. Stamou, M. Latsa, D. Assimacopoulos // Journal of Hydroinformatics. – 2000. – № 2 (4). – P. 235–245.

О. К. НАГОРНА^{1*}

^{1*}Каф. «Гідравліка», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24^а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс. +38 (066) 752 13 32, ел. пошта ek_n@i.ua

CFD-МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ МАСОПЕРЕНОСУ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ ВІДСТІЙНИКУ

Мета. В теперішній час в світі активно розвивається науковий напрямок по створенню теоретичних методів розрахунку каналізаційних відстійників. На практиці інженери використовують, як правило, балансові моделі та одномірні кінематичні моделі. Дані моделі не враховують гідродинаміку потоку усередині відстійника і його складну геометричну форму. Це є суттєвою перешкодою на шляху широкого застосування рівнянь Нав'є-Стокса в повсякденній практиці проектування. Застосування CFD-моделей, заснованих на вирішенні рівнянь Нав'є-Стокса вимагає застосування дуже дрібної сітки, що призводить до істотних витрат комп'ютерного часу на отримання прогнозних даних. Потрібно створення ефективної CFD-моделі для дослідження процесу очищення стічних вод у вертикальних відстійниках з урахуванням їх геометричної форми і конструктивних особливостей. **Методика.** Застосовуються різницеві схеми розщеплення, що реалізуються методом «бегущего счета». **Результати.** Розроблена 2-D-CFD-модель, що дозволяє протягом декількох секунд виконати розрахунок вертикального відстійника з урахуванням його геометричної форми, наявності центральної труби, її параметрів, наявності розсікача перед виходом з труби. Застосування в побудованій моделі методу маркування розрахункової області дає можливість виконувати пряме чисельне моделювання гідродинаміки течії і масопереносу у відстійниках без обмеження на їх форму. **Наукова новизна.** Створення CFD-моделей, що дозволяють, з одного боку врахувати геометричну форму відстійника, основні фізичні процеси масопереносу в споруді, а з іншого боку – вимагають невеликих затрат часу на отримання результатів. **Практична значимість.** Розроблена CFD-модель та побудований на її основі код дозволяють, при малих витратах комп'ютерного часу – приблизно таких же, як і при розрахунку одномірної моделі, вирішувати складні багатопараметричні завдання, що виникають на етапі проектування вертикальних відстійників з урахуванням їх форми і конструктивних особливостей.

Ключові слова: вертикальний відстійник; CFD-модель; чисельне моделювання; масоперенос

E. K. NAGORNAYA^{1*}

^{1*}Department of Hydraulics, Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernishevskogo, 24^a, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine, tel. +38 (066) 752 13 32, e-mail ek_n@i.ua

CFD-MODEL OF THE MASS TRANSFER IN THE VERTICAL SETTLER

Purpose. Nowadays the mathematical models of the secondary settlers are intensively developed. As a rule the engineers use the 0-D models or 1-D models to design settlers. But these models do not take into account the hydrodynamics process inside the settler and its geometrical form. That is why the CFD-models based on Navier - Stokes equations are not widely used in practice now. The use of CFD-models based on Navier - Stokes equations needs to incorporate very refine grid. It is very actually now to develop the CFD-models which permit to take into account the geometrical form of the settler, the most important physical processes and needs small computer time for calculation. That is why the development of the 2-D numerical model for the investigation of the waste waters transfer in the vertical settlers which permits to take into account the geometrical form and the constructive features of the settler is essential. **Methodology.** The finite - difference schemes are applied. **Findings.** The new 2-D-CFD-model was developed, which permits to perform the CFD investigation of the vertical settler. This model takes into account the geometrical form of the settler, the central pipe inside it and others peculiarities. The method of «porosity technique» is used to create the geometrical form of the settler in the numerical model. This technique permits to build any geometrical form of the settler for CFD investigation. **Originality.** Making of CFD-model which permits on the one hand to take into account the geometrical form of the settler, basic physical processes of mass transfer in construction and on the other hand requiring the low time cost in order to obtain results. **Practical value.** CFD-model is designed and code which is constructed on its basis allows at low cost of computer time and

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

about the same as in the calculation of the 1-D model to solve complex multiparameter problems that arise during the design of vertical settlers with their shape and design features.

Keywords: vertical settler; CFD model; numerical simulation; mass transfer

REFERENCES

1. Belyayev N.N., Nagornaya H.K. 3D raschet vertikalnogo otstoynika na baze CFD modeli [3D calculation of vertical settler based on CFD model]. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universitetu* [Scientific works of Vinnytsia National Technical University], Vinnytsia, 2012, no. 3, pp. 1-10. Available at: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2012_3/2012-3.htm (Accessed 28 January 2013).
2. Belyayev N.N., Nagornaya E.K. K raschetu protsessa massoperenosa v vertikalnom otstoynike [Calculation of mass transfer in a vertical settler]. *Voda i vodoochisni tekhnologii. Naukovo-tekhnichni visti – Water and wastewater treatment technologies. Scientific and technical news*, 2012, no. 3 (9), pp. 32-40.
3. Belyayev N.N., Nagornaya E.K., Horsep P.V., Tischenko S.S. Modelirovaniye protessa massoperenosa s uchedom energoeffektivnosti v vertikalnom otstoynike [Modeling of mass transfer in view of energy efficiency in the vertical settler]. *Energozberezhennia v budivnytstvi ta arkhitekturi* [Energy savings in construction and architecture], Kiev, 2012, no. 3, pp. 114-120.
4. Davydov E.I., Lyamayev B.F. Issledovaniye i raschet vertikalnogo otstoynika so spiralno-navitoy nasadkoy [Investigation and calculation of vertical settler with spiral-wound packing]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*, 2011, no. 5, pp. 10-15.
5. Zhurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chyslennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution in the environment]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
6. Loytsyanskiy L.H. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 735 p.
7. Marchuk H.Y. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
8. Oleynik A.Ya., Kalugin Yu.Y., Stepovaya N.G., Zyablikov S.M. Teoretycheskiy analiz protsessov osazhdeniya v sistemakh biologicheskoy ochistki stochnykh vod [Theoretical analysis of deposition processes in biological wastewater treatment]. *Prikladnaya gidromekhanika – Applied Hydromechanics*, 2004, no. 4, pp. 62-67.
9. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
10. Stepova N.H., Kaluhin Yu.I., Oliynyk O.Ya. *Do rozrakhunku vertykalnoho vidstiinyka z urakhuvanniam formy yoho nyzhnoi chastyny* [Calculation of vertical settler with the shape of its bottom]. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki* [Problems of water supply, sewerage and hydraulic], 2010, no. 14, pp. 145-151.
11. Tavartkyladze I.M., Kravchuk A.M., Nechypor O.M. Matematicheskaya model rascheta vertikalnykh otstoynikov s peregorodkoy [A mathematical model for calculating vertical tanks with divider]. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2006, no. 1, part 2, pp. 39-42.
12. Al-Qudah O.M., Walton J.C. Sedimentation Tank Simulation Design and Application in Wadi Al-Arab WWTP (Jordan). 18 p. Available at: <http://utminers.utep.edu/omal/design%20report1.htm> (Accessed 28 January 2013).
13. Bürger R., Diehl S., Nopens I. A consistent modeling methodology for secondary settling tanks in wastewater treatment. *Water Research*, 2011, no. 45(6), pp. 2247-2260.
14. Holenda B. Development of modeling, control and optimization tools for the activated sludge process. Cand. Diss. Pannonia, 2007. 155 p.
15. Holenda B., Pasztor I., Karpati A., Redey A. Comparison of one-dimensional secondary settling tank models. E-Water Official Publication of the European Water Association (EWA), EWA, 2006, 17 p. Available at: http://www.ewaonline.de/journal/2006_06.pdf. (accessed 28 January 2013).
16. David R., VandeWouwer A., Saucez P., Vassel J.-L. Classical Models of Secondary Settlers Revisited. [Proc. 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 2006) and 9th International Symposium on Process Systems Engineering]. Belgium, 2006, pp. 677-682.
17. Griborio A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Doct. Diss. New Orleans, USA, 2004. 440 p.
18. Plosz B. G., Nopens I., Rieger L., Griborio A., De Clercq J., Vanrolleghem P.A., Daigger G.T., Takacs, 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 (WWTmod2012)]. Mont-Sainte-Anne, Quebec, 2012, pp. 27-30.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

19. Plosz B.G., Clercq J.De, Nopens I., Benedetti L., Vanrolleghem P.A. Shall we upgrade one-dimensional secondary settler models used in WWTP simulators? – An assessment of model structure uncertainty and its propagation. *Water Science and Technology*, 2011, no. 63(8), pp. 1726-1738.
20. Ramin E., Sin G., Mikkelsen P.S., Plosz B.G. Significance of uncertainties derived from settling tank model structure and parameters on predicting WWTP performance – A global sensitivity analysis study [Proc. 8th IWA Symposium on Systems Analysis and Integrated Assessment Watermatex 2011]. San Sebastian, 2011, pp. 476-483.
21. Schamber D.R., Larock B.E. Numerical analysis of flow in sedimentation basins. *Journal Hydraulic Division*, 1981. pp. 595-591.
22. Shahrokhi M., Rostami F., Md Azlin Md Said, Syafalni. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks [Proc. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology]. Singapore, 2011, vol. 6, pp. V2-392-V2-396.
23. Shaw A., McGuffie S., Wallis-Lage C., Barnard J. Optimizing Energy Dissipating Inlet (Edi) Design In Clarifiers Using An Innovative CFD Tool. *Water Environment Federation (WEFTEC)*, 2005, pp. 8719-8736.
24. Stamou A.I., Latsa M., Assimacopoulos D. Design of two-storey final settling tanks using mathematical models. *Journal of Hydroinformatics*, 2000, no. 2(4), pp. 235-245.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина);
д.т.н., проф. В. Н. Деревянко (Украина).

Поступила в редколлегию 25.10.2012

Принята к печати 21.02.2013