

УДК 622.5: 628.35

Н. Н. БЕЛЯЕВ– д.т.н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна., кафедра «Гидравлика и водоснабжение», gidravlika2013@mail.ru

Л. Ф. ДОЛИНА– к.т.н., прив.-профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна., кафедра «Гидравлика и водоснабжение», dolinalf@yandex.ua

В. А. КОЗАЧИНА– ассистент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна., кафедра «Гидравлика и водоснабжение», kozachynav@yandex.ua

## СНИЖЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОЕМ ПРИ СБРОСЕ СТОЧНЫХ ВОД ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОТСТОЙНИКОВ

*Статью представил д. т. н., проф. В. Д. Петренко*

### Постановка проблемы

В процессе очистки промышленных и бытовых сточных вод механическая очистка является неотъемлемой составляющей. Известно, что после прохождения очистки сточные воды сбрасываются в водоем. Поэтому совершенно очевидно, что если эффективность очистки сточных вод от взвешенных веществ является низкой, то в результате этого происходит интенсивное загрязнение водоема – приемника сточных вод. Одним из важных элементов очистных сооружений, который производит механическую очистку вод от взвешенных примесей, является горизонтальный отстойник. В последнее время активизировался процесс модификации конструкции горизонтальных отстойников с целью повышения эффективности их работы. Это явилось причиной стимуляции разработки новых методик, позволяющих оценить эффективность модифицированных отстойников на этапе их проектирования.

В Украине для расчета горизонтальных отстойников применяются эмпирические модели [4,7]. Данные модели не учитывают геометрическую форму отстойника и гидродинамику течения в сооружении. Поэтому,

для практики крайне важно разрабатывать такие методики расчета отстойников, которые позволяли бы учитывать наиболее существенные факторы, влияющие на процесс массопереноса в отстойниках, а именно, его форму, диффузию, неравномерное поле скорости течения в сооружении [2,3]. Анализ последних исследований и публикаций. В Украине для расчета горизонтальных отстойников применяются эмпирические модели [4,7]. Данные модели не учитывают геометрическую форму отстойника и гидродинамику течения в сооружении. Поэтому, для практики крайне важно разрабатывать такие методики расчета отстойников, которые позволяли бы учитывать наиболее существенные факторы, влияющие на процесс массопереноса в отстойниках, а именно, его форму, диффузию, неравномерное поле скорости течения в сооружении [2,3].

### Цель

Целью данной работы является разработка численной модели массопереноса (CFD модель) в горизонтальном отстойнике, позволяющей учитывать при моделировании геометрическую форму отстойника и его конструктивные особенности.

## Математическая модель процесса осветления воды в горизонтальном отстойнике

Расчет процесса осветления воды в отстойнике разбивается на два этапа. На первом этапе выполняется расчет поля скорости водного потока внутри отстойника. Для решения этой гидродинамической задачи используется уравнение потенциального течения [2]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Граничные условия для данного уравнения рассмотрены в работе [2]:

После расчета поля потенциала скорости внутри отстойника определяются компоненты вектора скорости потока внутри отстойника на основании соотношений [8]

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Полученное значение компонент вектора скорости течения потока внутри горизонтального отстойника используется на втором этапе – расчет транспорта примеси в отстойнике на базе осредненного по ширине сооружения конвективно-диффузионного уравнения переноса примеси [2]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация примеси в воде;  $u, v$  – компоненты вектора скорости течения;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты диффузии;  $t$  – время;  $w$  – скорость оседания загрязнителя;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий процессы агломерации и т.п. в отстойнике.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [2].

### Метод решения

Формирование формы горизонтального отстойника на прямоугольной разностной сетке осуществляется с помощью метода

маркирования [5]. Значения концентрации примеси и потенциала скорости рассчитываются в центрах разностных ячеек. Компоненты вектора скорости определяются на серединах сторон разностных ячеек. Для численного интегрирования уравнения (1) используется метод А.А. Самарского [9]. Для численного интегрирования уравнения массопереноса (3) применяется неявная разностная схема [2, 5]. Расчет неизвестных величин  $P$  и  $C$  осуществляется по методу бегущего счета в построенной численной модели.

### Практическая реализация модели

На основе разработанной CFD модели создан код “Отстойник-2М”, реализованный на алгоритмическом языке FORTRAN.

Построенная CFD модель была использована для моделирования процесса массопереноса в горизонтальном отстойнике, в котором располагаются струенаправляющие пластины. Конструкция такого отстойника предложена в работе [6]. Цель моделирования – оценка эффективности очистки воды в данном отстойнике (рис. 1).

Расчет выполнен при таких параметрах: размеры расчетной области 9 x 4,5 м;  $w = 0,0027$  м/с;  $\sigma = 0$ ; скорость потока на входе в отстойник равна 0,07 м/с. Концентрация загрязнителя во входящем в отстойник потоке принята равной 100 ед (в безразмерном виде). При проведении вычислительного эксперимента варьировалось положение вертикальной перегородки относительно входа в отстойник. Рассматривалось три варианта:

- первый вариант (рис. 2) – вертикальная перегородка расположена возле струенаправляющих пластин;
- второй вариант (рис. 3) – вертикальная перегородка расположена равноудалено от струенаправляющих пластин и водопадающего лотка;

- третий вариант (рис. 4) – вертикальная перегородка расположена возле водоподающего лотка.

### Результаты

Результаты расчета процесса осветления воды в отстойнике показаны на рис. 2 – 4. Здесь приведено поле концентрации примеси в отстойнике для всех рассматриваемых вариантов. Печать чисел на рисунках выполнена по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать.

Представление результатов расчета в виде матрицы дает возможность быстро определить концентрацию взвешенных веществ в любой зоне отстойника. Особый интерес представляет значение концентрации на выходе из отстойника. Из рис. 2 – 4 видно, что положение вертикальной перегородки оказывает влияние на процесс осветления. Так, для первого варианта концентрация на выходе составляет порядка 22% от начальной концентрации, для второго варианта – порядка 20%, для третьего – порядка 4-5%. Улучшение процесса осветления для третьего варианта объясняется тем, что при близком расположении вертикальной перегородки к водоподающему лотку происходит локальное ускорение водного потока по направлению ко дну отстойника, то есть в данном случае скорость оседания взвешенных веществ суммируется со скоростью водного потока.

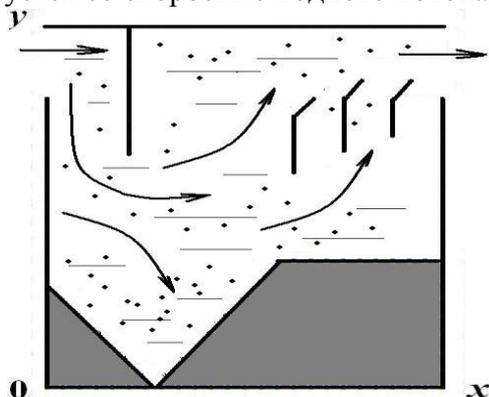


Рис. 1. Схема горизонтального отстойника со струенаправляющими пластинами

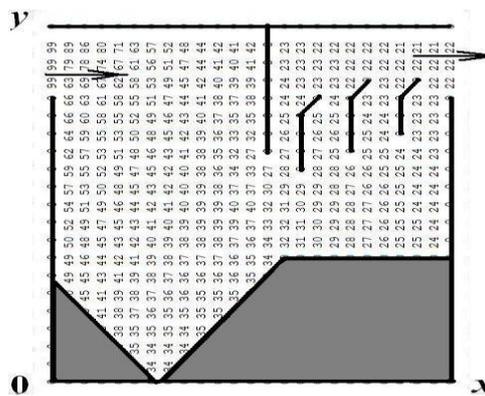


Рис. 2. Распределение концентрации загрязнителя в горизонтальном отстойнике (первый вариант)

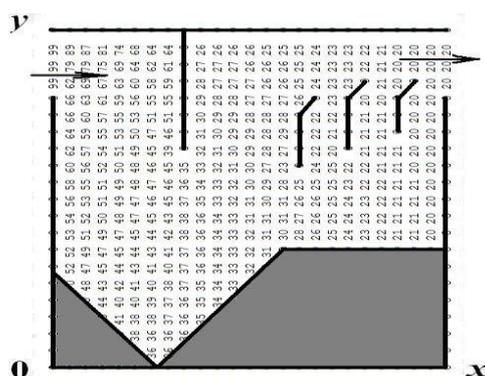


Рис. 3. Распределение концентрации загрязнителя в горизонтальном отстойнике (второй вариант)

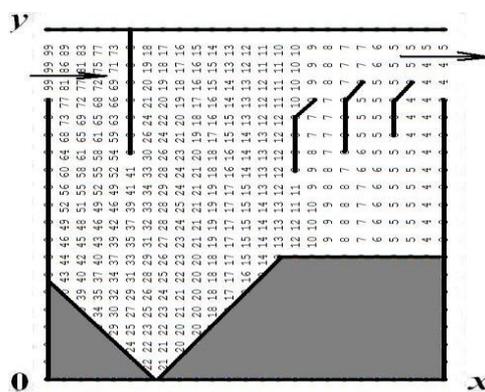


Рис. 4. Распределение концентрации загрязнителя в горизонтальном отстойнике (третий вариант)

В заключение следует отметить, что для расчета одного варианта задачи потребовалось 10 с компьютерного времени. Таким образом, для решения сложной задачи осветления воды в отстойнике, имеющем

сложную геометрическую формы требуются небольшие затраты времени.

Для тестирования разработанной численной модели был проведен эксперимент в лаборатории гидравлики ДИИТа. Была сделана модель горизонтального отстойника с двумя пластинами. В отстойник импульсно подавалась примесь (глина). В каждом эксперименте подача примеси составляла  $m_0 = 4$  г. Определялась, какая масса примеси выйдет из отстойника, а значит, определялась эффективность его работы. По известным параметрам экспериментальной установки (ее размеры, расход воды, масса примеси, гидравлическая крупность) выполнялся расчет по разработанной численной модели. Результаты сравнения показаны в табл. 1. В этой таблице:  $m_2$  – масса примеси, вышедшая из отстойника,  $m_1 = m_0 - m_2$  – масса примеси, осевшая из отстойника.

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных данных							
№ экспе-рим.	1	2	3	4	5	6	7
Q, л/с	0,27	0,25	0,25	0,24	0,26	0,24	0,23
$m_2$	1,47	1,39	1,38	1,28	1,45	1,3	1,21
$m_1$	2,43	2,58	2,54	2,63	2,50	2,64	2,69
$m_1$ (расчет)	2,11	2,21	2,19	2,27	2,17	2,26	2,32

Как видно из анализа данных, представленных в таблице, имеет место удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. На рис. 5 – 7 показана динамика формирования зоны загрязнения внутри отстойника. Хорошо видно, что в силу импульсной подачи примеси, внутри отстойника формируется неустойчивая по форме и размерам зона загрязнения, которая сносится к выходному отверстию.



Рис. 5. Распределение примеси в отстойнике (t=0,1 с)



Рис. 6. Распределение примеси в отстойнике (t=0,2 с)

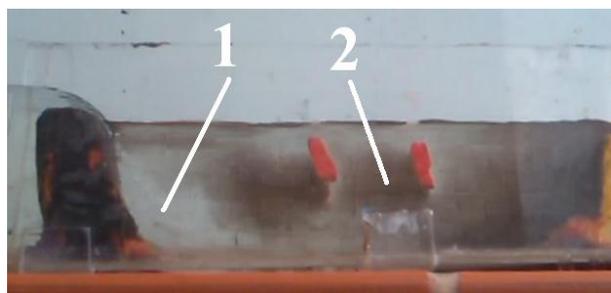


Рис. 7. Зона загрязнения в отстойнике (t=2,1 с)  
 1 – зона, свободная от примеси; 2 – зона загрязнения

### Расчет техногенной нагрузки на водоем при сбросе сточных вод

Снижение антропогенного воздействия на водоем при сбросе точных вод после очистных сооружений можно оценить путем расчета концентрации взвешенных веществ в этом водоеме после очистки. Для этого необходимо рассчитать интенсивность загрязнения водоема при сбросе сточных вод, которые прошли очистку в обыкновенном горизонтальном отстойнике и в горизонтальном отстойнике модифицированной конструкции (рис. 3). Для такого расчета будем использовать метод ВОДГЕО [1]. Расчет выполнен для следующих параметров реки: ширина реки 20 м, глубина реки 2 м, шероховатость русла реки 0,02, фоновая концентрация загрязнителя  $0 \text{ г/м}^3$ , расход воды в реке  $21 \text{ м}^3/\text{с}$ , расход сточных вод  $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ , параметр извилистости русла 0,1. Если в обыкновенном отстойнике, имеющем те же размеры, что и модифицированный, концентрация взвешенных веществ на выходе из сооружения составляла 43 %, а в модифицированном отстойнике (см. рис. 3) – 20 %, то влияние эффективности очистки на изменение интенсивности загрязнения водоема можно оценить по данным, показанным в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение концентрации загрязнителя при сбросе вод после очистки в обычном (Собычн) и модифицированном (Смодиф) отстойниках

Расстояние от места сброса	$C_{\text{обычн}}$ (безразмерное значение)	$C_{\text{модиф}}$ (безразмерное значение)
$x = 100 \text{ м}$	3,1	1,4
$x = 200 \text{ м}$	1,6	0,7
$x = 300 \text{ м}$	1,0	0,4

Как видно из данной таблицы, повышение эффективности работы горизонтального отстойника за счет его модификации позволяет снизить нагрузку на водный объект.

### Выводы

В работе представлена новая CFD модель для расчета процесса очистки воды в горизонтальных отстойниках. Модель дает возможность рассчитывать процесс массопереноса с учетом сложной геометрической формы очистного сооружения. Дальнейшее совершенствование рассмотренной в предложенной модели необходимо проводить в направлении ее развития для моделирования трехмерного процесса переноса примеси в горизонтальных отстойниках.

### Библиографический список

1. Біляєв, М. М. Моделювання і прогнозування стану довкілля [Текст] / М. М. Біляєв, В. М. Багрій, І. І. Дуднікова. – Дніпропетровськ: Видво Маковецький Ю. В., 2010. – 188 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Днепропетровск: Нова ідеологія, 2012. – 112 с.
3. Беляев, Н. Н. К расчету вертикального отстойника на базе CFD модели [Текст] / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная // Вісник Нац. ун-ту водного господарства та природокористування. – Рівне. – 2012. – №1 (57). – С. 32-41.
4. Василенко, О. А. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та

- розрахунки [Текст] / О. А. Василенко, С. М. Епоян – Київ – Харків, КНУБА, ХНУБА, ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.
5. Згуровский, М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ: Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Исмаилова, Э. К. К вопросу очистки сточных вод с высоким содержанием взвешенных веществ [Электронный ресурс] / Э. К. Исмаилова, М. К. Оспанулова, А. К. Киргизбаев, А. С. Куйчиев // Режим доступа arch.kyrlibnet.kg/uploads/kgusta ISMAILOVA E. K., OSPANKULOVA M. K., KIRGIZBAEV A. K., KUJCHIEV A. S..pdf
7. Ласков, Ю. М., Примеры расчетов канализационных сооружений: учеб. пособие для вузов. [Текст] / Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун – Москва: Высш. Школа, 1981. – 232 с.
8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский – Москва: Наука, 1978. – 735 с.
9. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – Москва: Наука, 1983. – 616 с.
- Ключові слова:** чисельне моделювання, горизонтальний відстійник, CFD модель.
- Ключевые слова:** численное моделирование, горизонтальный отстойник, CFD модель.
- Keywords:** numerical simulation, horizontal settler, CFD model.

Надійшла до редколегії 21.02.2012