

РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА НА БАЗЕ CFD МОДЕЛИ

*к.т.н., Нагорная Е. К.**Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

Введение. Канализационные отстойники (первичные, вторичные) являются одним из важнейших элементов в системе очистки сточных вод. Данные сооружения определяют, в значительной степени, эффективность функционирования комплекса очистных сооружений в целом. Вертикальные отстойники широко используются в настоящее время в системах водоотведения малых промышленных объектов. Оценка эффективности работы этих отстойников на стадии проектирования комплекса очистных сооружений – сложная и ответственная задача.

В настоящее время, в мире активно развиваются теоретические методы расчета вертикальных отстойников. Это связано с тем, что проведение экспериментальных исследований, в данной области, требует много времени на постановку эксперимента, его проведение и обработку экспериментальных данных. Кроме этого, при проведении экспериментальных исследований используется дорогостоящее оборудование, при этом измерение интересующих параметров происходит без «внедрения» прибора в поток [1] (например, система ADV – *Acoustic Doppler Velocity measurements* и т.п.). Поэтому физический эксперимент не может служить каждодневным инструментом для решения задач, возникающих на этапе проектирования очистных сооружений или их реконструкции. Для расчета данных сооружений применяются следующие группы моделей: эмпирические [2], балансовые [3,4], одномерные кинематические модели переноса загрязнителя в сооружениях [5,6,7]. Эти модели экономичны и просты для практического применения. Однако серьезным недостатком перечисленных групп моделей является то, что они не учитывают геометрическую форму отстойника или другие его конструктивные особенности (например, перегородки внутри сооружения). Применение одномерных кинематических моделей для расчета отстойников, имеющих сложную геометрическую форму – невозможно. Учет геометрической формы отстойника может быть осуществлен только при использовании многомерных моделей. Такие модели требуют обязательного решения гидродинамической задачи по определению поля скорости потока внутри отстойника. За рубежом для решения гидродинамической задачи применяется, как правило, модель вязкой жидкости (уравнения Навье - Стокса). Реализация данной CFD модели требует применения очень мелкой сетки, что является причиной больших временных затрат на получение результата. Кроме этого, необходимо строгое обоснование применяемой модели турбулентности для расчета данного класса течений. В Украине

многомерные CFD модели для расчета вертикальных отстойников – не разрабатываются. В этой связи, актуальной проблемой является разработка эффективных методов расчета вертикальных отстойников, основанных на применении CFD моделей и позволяющих оперативно, с малыми финансовыми затратами, рассчитывать данные сооружения, имеющие сложную геометрическую форму.

Целью данной работы является разработка 2D CFD модели массопереноса в вертикальном отстойнике, позволяющей учитывать при моделировании геометрическую форму отстойника.

Математическая модель процесса массопереноса. Для расчета транспорта загрязнителя в вертикальном отстойнике используется осредненное по ширине сооружения уравнение переноса примеси [8]

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

где C – концентрация загрязнителя в сточной воде; u, v – компоненты вектора скорости течения; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии; t – время; w – скорость оседания загрязнителя; σ – коэффициент, учитывающий дополнительные процессы, происходящие в отстойнике и влияющие на баланс концентрации (биореакции, флокуляция и агломерация частиц и хлопьев за счет турбулентности и др.).

Отметим, что при использовании модели (1) компоненты вектора скорости течения сточных вод в отстойнике должны удовлетворять уравнению неразрывности.

В построенной численной модели на твердых непроницаемых стенках реализуется граничное условие вида

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

где n – единичный вектор внешней нормали к твердой поверхности.

На горизонтальных границах в численной модели реализуется граничное условие «поглощения» загрязнителя. 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.

В начальный момент времени полагается $C = 0$ в расчетной области. Задача транспорта загрязнителя в отстойнике решается на установление решения.

Гидродинамическая модель. Для практического использования модели (1) транспорта загрязнителя в вертикальном отстойнике необходимо рассчитать поле скорости потока внутри сооружения. Для решения этой

гидродинамической задачи используется модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид [9]

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

где P - потенциал скорости.

Для данного уравнения ставятся следующие граничные условия [9]:

- на твердых стенках отстойника, перегородках 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 - известное значение скорости втекания;

- на выходной границе расчетной области (область выхода осветленных вод из отстойника) $P = P^*(x = const, y) + const$ (условие Дирихле)

Если поле потенциала скорости определено, то компоненты вектора скорости потока сточных вод в отстойнике рассчитываются по зависимостям [9]

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

Метод решения. Численное интегрирование уравнения транспорта загрязнителя в отстойнике производится по попеременно – треугольной разностной схеме [10]. Численный расчет реализуется на прямоугольной разностной сетке. Значение концентрации загрязнителя рассчитывается в центрах разностных ячеек.

Разностные соотношения данной схемы в операторном виде записываются так [10]

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

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

на втором шаге расщепления $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$:

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

на третьем шаге расщепления $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$:

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

на четвертом шаге расщепления $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$:

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

В данных выражениях использованы следующие обозначения разностных

операторов

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

и т.д. В приведенных обозначениях принято $v = v - w$.

Пояснение к данным разностным операторам представлено в работе [12]. Неизвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной формуле «бегущего счета».

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

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

здесь t - фиктивное время.

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

Численное интегрирование уравнения (3) осуществляется с помощью неявной схемы суммарной аппроксимации [11]. В этом случае разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид

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

Отметим, что значение потенциала скорости $P_{i,j}$ в центре каждой разностной ячейки, на каждом шаге расщепления, осуществляется по явной формуле – методу бегущего счета [11].

В численной модели компоненты вектора скорости определяются по формулам

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Компоненты вектора скорости водной среды рассчитываются на гранях разностных ячеек (контрольных объемов), что позволяет построить консервативную разностную схему для уравнения транспорта загрязнителя. При решении эволюционного уравнения (3) задается поле потенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени.

Для численного интегрирования уравнения (2) разработанном коде применяется также метод Либмана [11]. 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:

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

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.

Особенностью моделирования массопереноса в вертикальных отстойниках является необходимость проведения численного интегрирования уравнений модели в области сложной геометрической формы. Для формирования геометрической формы отстойника на прямоугольной разностной сетке и учета всех его конструктивных особенностей применяется метод маркирования [10]. Это дает возможность быстро формировать любую геометрическую форму отстойника, без каких либо налагаемых на нее ограничений.

Практическая реализация модели. На основе построенной численной модели создан код «Settler- 2», реализованный на алгоритмическом языке *FORTRAN*. Основу данного кода составляют подпрограммы типа *SUBROUTINE*, координацию работы подпрограмм осуществляет основная программа *MAINPRG*. Ввод исходных данных осуществляется с помощью файла исходных данных типа «DATA».

Разработанная численная модель была использована для анализа эффективности работы мини-отстойника (рис. 1). Цель моделирования - оценка эффективности очистки сточных вод в отстойниках рассматриваемого типа.

Численное моделирование выполнялось при следующих исходных данных: длина расчетной области – 3,4 м, ширина – 4,2 м, скорость потока на

входе – 12 м/ч, коэффициент диффузии – 0,9 м²/ч, скорость осаждения примеси – 0,2 м/ч, $\sigma=0$, концентрация загрязнителя во входящем в отстойник потоке равна 100 ед. (в безразмерном виде).

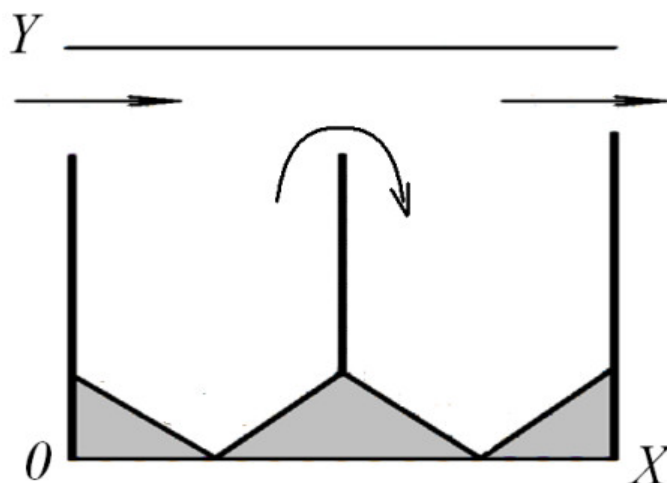


Рис. 1. Расчетная схема вертикального отстойника

На рис. 2 представлено распределение концентрации загрязнителя в отстойнике рассматриваемой конструкции. Значение концентрации на рисунке представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины входной концентрации. Печать чисел осуществляется по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «65,41 %» от концентрации на входе в отстойник, то на печать будет выведено число «65». Данный подход к такому выводу результатов на «печать» эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов с целью выбора наиболее оптимальной конструкции сооружения.

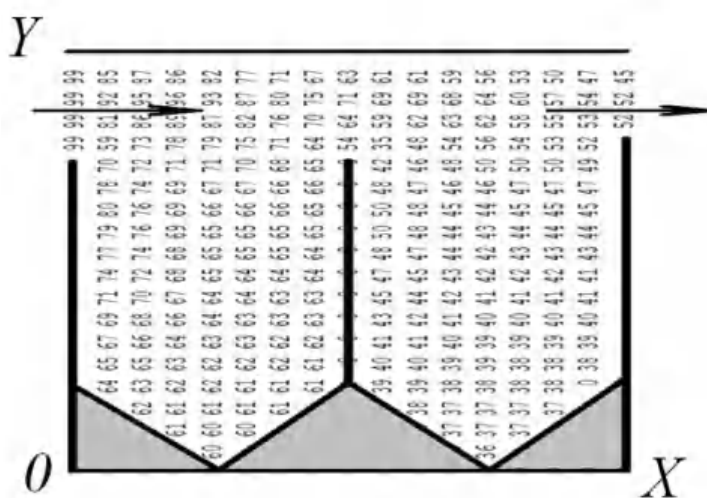


Рис. 2. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике

В заключение отметим, что для расчета варианта задачи потребовалось 15с компьютерного времени. Таким образом, для решения сложной многопараметрической задачи массопереноса в вертикальном отстойнике, требуются незначительные временные затраты при использовании разработанной численной модели. Это является важным обстоятельством при проведении серийных расчетов.

Выводы. В работе представлена численная (CFD) модель для исследования процесса массопереноса в канализационных вертикальных отстойниках сложной геометрической формы. Разработанный специализированный код может быть использован как инструмент решения комплекса задач при проектировании и реконструкции вертикальных отстойников.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. New measurements techniques for secondary settlers: a review / P.A.Vanrolleghem et al/ doi:10.2166/wst.2006.148/ pp.419-429.
2. Медведев Г. П. Экспериментальное исследование радиальных отстойников (в порядке обсуждения) / Г. П. Медведев, Б. Г. Мишуков // Водоснабжение и санитарная техника. – М., 2001. - №8. – С. 18 – 20.
3. Таварткиладзе И. М. Математическая модель расчета вертикальных отстойников с перегородкой [Текст] / И. М. Таварткиладзе, А. М. Кравчук, О. М. Нечипор // Водоснабжение и санитарная техника. – Вып. № 1. – 2006. –Ч. 2. - С. 39-42.
4. Validation and application of a simple model for circular secondary settlings tanks / A.L. Stamou et al, Global NEST Journal, Vol.10,No1, pp.62-72.
5. Олейник А. Я. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод [Текст] / А. Я. Олейник, Ю. И. Калугин, Н. Г. Степовая, С. М. Зябликов // Прикладная гидромеханика. – Том 6 (78). – № 4. -2004. - С. 62-67.
6. Степова Н. Г. До розрахунку вертикального відстійника з урахуванням форми його нижньої частини [Текст] / Н. Г. Степова, Ю. І. Калугін Ю.І., О. Я. Олійник // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравлики. - Вип. № 14. - 2010. - С.145 -151.
7. Anastasios L. Stamou. A 1-D model for secondary circular clarifiers //Protection and Restoration of the Environment VII-Mykonos 2004.
8. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
9. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. - М. : Наука, 1978. – 735 с.
- 10.Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
- 11.Самарский А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. - М. : Наука, 1983. – 616 с.