

5. Кудинов В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников – М.: Высш. шк., 2005. – 430 с.

6. Веселовський В.Б. Розрахунок температурних полів складених конструкцій / В.Б. Веселовський, О.В. Берлов // Вісник ТДТУ. – Тернопіль. – Вип.№1, 2008. – С.161-170.

7. Веселовский В.Б. Структурные решения задач нестационарной теплопроводности для составных теплозащитных покрытий / В.Б. Веселовский, А.В. Берлов // Зб. Наук. пр. ДНУ. – Д.: Диференціальні рівняння та їх застосування. 2005. – С.62-72.

8. Берлов А.В. Решение структурным методом задач теплопроводности для составных элементов конструкций при воздействии электромагнитных полей / А.В. Берлов // Зб. Наук. пр. ДНУ. – Д.: Диференціальні рівняння та їх застосування. 2006. – С.73-81.

9. Мощнейший портативный лазер Wicked Lasers Arctic Spider III [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://xage.ru/comments.php?id=15873>.

*Рекомендовано до публікації д.т.н.Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 26.10.2012*

УДК 625.35

© Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА НА БАЗЕ 3D CFD МОДЕЛИ

Разработана 3D CFD модель для расчета вертикального отстойника. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и модели потенциального течения. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Розроблено 3D CFD модель для розрахунку вертикального відстійника. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі потенціальної течії. Наведено результати чисельного експерименту.

3D CFD model developed to calculate the vertical settlers. The model is based on numerical simulations of convection-diffusion transport of impurities and the potential flow model/ The results of numerical experiments.

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. Кроме этого, необходимо учитывать, что после вторичных 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. 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 кон-

струкция, габариты и т.п., возможно расчетным путем - на основе метода математического моделирования. К настоящему времени, большинство прикладных методов расчета вертикальных отстойников базируется на применении одномерных кинематических моделей транспорта загрязнителя в отстойниках [3,4,9] или на применении нуль-мерных (балансовых) моделей [1]. Эти модели не позволяют учитывать гидравлический режим работы отстойника и его геометрическую форму. Наиболее совершенным инструментом математического моделирования работы отстойника являются многомерные CFD модели. В настоящее время, в Украине, многомерные CFD модели для расчета отстойников, имеющих сложную геометрическую форму – 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, с учетом их конструктивных особенностей.

Целью данной работы является разработка 3D CFD модели массопереноса в вертикальном отстойнике, позволяющей учитывать при моделировании геометрическую форму отстойника.

Математическая модель транспорта загрязнителя. Для расчета транспорта загрязнителя в вертикальном отстойнике используется 3D уравнение переноса примеси [5,7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + kC = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где C – концентрация загрязнителя в воде; u, v, w – компоненты вектора скорости течения; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты диффузии; t – время; w_s – скорость оседания загрязнителя; k – коэффициент, учитывающий процессы биохимического окисления в отстойнике.

Краевые условия для уравнения переноса.

На твердых непроницаемых границах реализуется граничное условие вида

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

где n – единичный вектор внешней нормали к твердой поверхности.

На твердых горизонтальных поверхностях отстойника в численной модели реализуется граничное условие «выпадения» загрязнителя из потока со скоростью w_s . 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

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

где $i+1, j, k$ – номер разностной ячейки на выходе из отстойника.

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

Модель гидродинамики. Для решения гидродинамической задачи - определения поля скорости в отстойнике, используется 3D модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид [6]

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

где P - потенциал скорости.

Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия [6]:

- 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)

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости потока сточных вод на базе зависимостей [6]

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

Численное решение уравнений модели. Численный расчет реализуется на прямоугольной разностной сетке. Значение концентрации загрязнителя и потенциала скорости рассчитывается в центрах разностных ячеек, а значение компонент вектора скорости – на гранях контрольных объемов (ячеек). Формирование геометрической формы отстойника на прямоугольной разностной сетке, осуществляется с помощью метода маркирования [2,5]. Такой подход дает возможность пользователю быстро формировать любую геометрическую форму отстойника, без каких либо налагаемых на нее ограничений.

Для численного интегрирования уравнения переноса загрязнителя в отстойнике применяется попеременно – треугольная неявная разностная схема расщепления [2,5]. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Либмана [8].

Практическая реализация модели. На основе построенной 3D CFD модели разработан специализированный код «Settler-3D». Для программирования использовался *FORTRAN*.

Построенная численная модель была использована для моделирования процесса массопереноса в вертикальном отстойнике с перегородкой и пластиной, которая располагается перед перегородкой (рис.1) . Вертикальная перего-

родка перегородживает отстойник по всей ширине, пластина – лишь частично. То есть, поток сточных вод обтекает пластину со всех сторон, а перегородку – только снизу (рис. 1.). Цель расчета - применение построенной трехмерной численной модели для оценки эффективности очистки воды в отстойнике рассматриваемой конструкции. При моделировании полагается, что скорость осаждения загрязнителя в отстойнике зависит от концентрации загрязнителя и эта зависимость выражается моделью Thomas & Vesilind [10]

$$v_s = ke^{-nC}.$$

При проведении вычислительного эксперимента полагается $k=0,8$, $n=0,35$.

Вычислительный эксперимент проводился при таких параметрах: длина отстойника – 6 м; ширина – 4,2 м; глубина - 5,8 м; скорость потока на входе в отстойник 12 м/ч; коэффициент диффузии по всем координатным направлениям – $3 \text{ м}^2/\text{ч}$; коэффициент биохимического окисления $\sigma=0$; высота перегородки – 2,9 м; высота пластины 2,3 м; ширина пластины 2 м. Концентрация загрязнителя во входящем в отстойник потоке равна $3000 \text{ г}/\text{м}^3$.

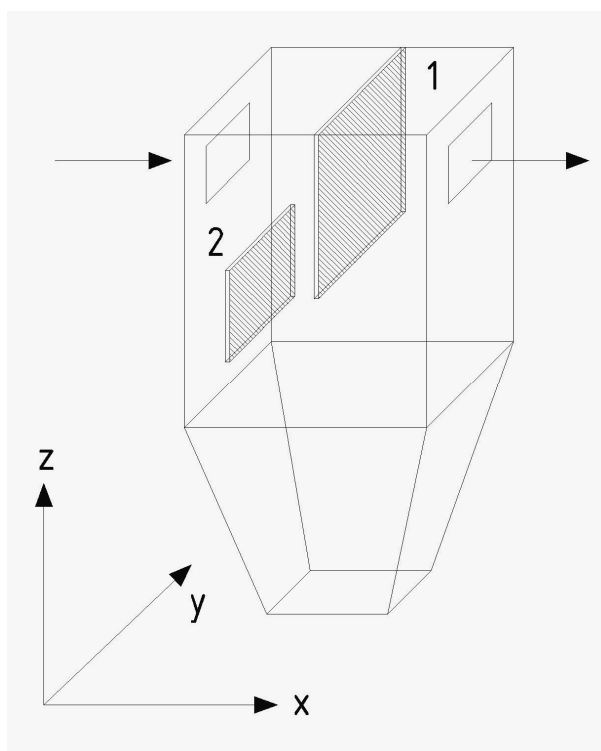


Рис. 1. Схема вертикального отстойника с перегородкой и пластиной

На рис. 2 представлено распределение значения концентрации загрязнителя в отстойнике (вид сбоку). В этом сечении показано, где происходит вход и выход сточных вод из отстойника. 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 расчетной точке значение концентрации составляет «75.86%» от концентрации на входе в отстойник, то на печать будет выведено число «75». Такой вывод результатов на печать принят для проведения быстрого их анализа.

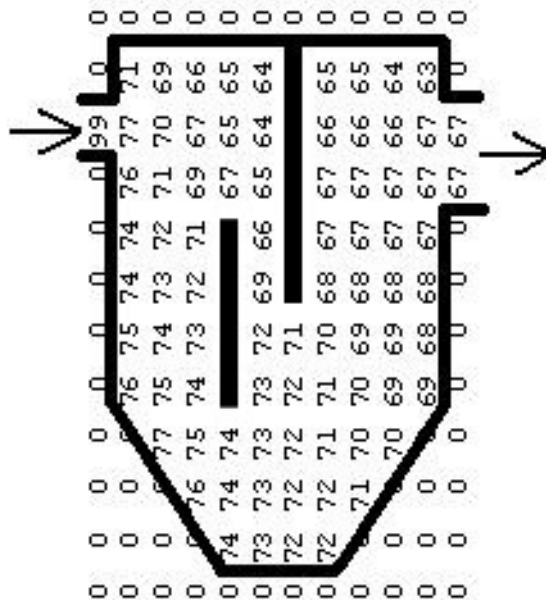


Рис. 2. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с перегородкой и пластиной (сечение $y=1,8$ м, концентрация внутри отстойника - в процентах от величины входной концентрации)

Из рис. 2 хорошо видно, что наличие пластины в потоке приводит к неравномерному распределению концентрации загрязнителя вблизи ее: так над пластиной концентрация составляет величину порядка 67%, а под пластиной – порядка 74%. Из данного рисунка видно, что концентрации загрязнителя на выходе из сооружения составляет порядка 67 % от входящей концентрации (в абсолютных числах – 2041 г/л.). Но в другой части выходного сечения эта величина составляет - 2058 г/л, т.е величину порядка 68%. Таков эффект очистки в данном сооружении при выбранных параметрах.

В заключение отметим, что для расчета одного варианта задачи потребовалось 1 мин. компьютерного времени. Такие минимальные затраты времени на проведение вычислительного эксперимента являются важным обстоятельством при проведении серийных расчетов на практике.

Выводы. В работе рассмотрено применение построенной 3D численной модели для исследования процесса массопереноса в вертикальном отстойнике сложной геометрической формы. Разработанная модель дает возможность оперативно рассчитать эффект очистки воды в отстойнике. Дальнейшее направление данной работы следует проводить в направлении разработки модели процесса массопереноса в отстойниках на базе модели отрывных вихревых течений идеальной жидкости.

Список литературы

1. Таварткиладзе И.М., А.М. Кравчук А.М., Нечипор О.М. Математическая модель расчета вертикальных отстойников с перегородкой. // Водоснабжение и санитарная техника Выпуск №1, ч. 2, 2006 г., с. 39-42.
2. Беляев Н.Н., Коренюк Е.Д., Хрущ В.К. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод.-Днепропетровск: Наука и образование, 2001.-156 с.
3. Олейник А.Я., Калугин Ю.И., Степовая Н.Г., Зябликов С.М.. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод. //Прикладная гидромеханика. 2004 г. Том 6 (78), №4. с.62-67.
4. Степова Н.Г., Калугін Ю.І., Олійник О.Я. До розрахунку вертикального відстійника з урахуванням форми його нижньої частини. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравлики. 2010 г., Випуск №14, с.145 -151.
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. - М.: Наука, 1978. – 735 с.
7. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. - М.: Мир, 1980. –616 с.
9. Anastasios L. Stamou. A 1-D model for secondary circular clarifiers //Protection and Restoration of the Environment VII-Mykonos 2004.
10. Jeppsson U. Modelling Aspects of Wastewater Treatment Process // Doctoral dissertation. Lund Institute of Technology, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund, Sweden, 1996. – 428 p.

*Рекомендовано до публікації д.т.н.Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 26.10.2012*

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, П.С. Кириченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫПУСКА ШАХТНЫХ ВОД В МОРЕ

На базе разработанной численной модели выполнен расчет устройства для сброса шахтных вод в море. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и модели потенциального течения. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

На базі розробленої чисельної моделі виконано розрахунок пристрою для скиду шахтних вод в акваторію моря. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі потенційного руху. Наводяться результати обчислювального експерименту.

The numerical model was developed to calculate the gadget for waste mine waters discharge into the sea. The model is based on the numerical integration of the K-gradient transport model and the model of the potential flow. The results of numerical experiment are presented.

Введение. В настоящее время как один из вариантов решения проблемы утилизации шахтных вод Криворожского района (подземные воды, сбрасываемые