

2. Гончарук В.В. Комплексная очистка сточных вод свалок твердых бытовых отходов / В.В. Гончарук, З.Н. Шкавро и др. // Химия и технология воды: научн. – Теор. журнал. –К.: Наукова думка, 2007.-том 29 №1 .- с. 55-65.
3. Поваров А.А. Комплексная установка по очистке дренажных вод полигонов ТБО/ А.А. Поваров, В.Д. Павлова // Waste tech - V Международный конгресс по управлению отходами и природоохранным технологиям. Сборник докладов 2007. - Москва. – с. 379-380.
4. Орел Д. Шведський досвід переробки твердих муніципальних відходів. Частина 1. Система поводження з твердими муніципальними відходами./ Д. Орел, О. Попович, М. Мальований// Ринок інсталяцій. - № 6. - (101). – 2005. - с. 43-45.
5. Вайсман Я.И. Очистка фильтрационных вод на различных этапах жизненного цикла полигона захоронения твердых бытовых отходов / Я.И. Вайсман, И.С. Глушанкова, Л.В. Рудакова. // Сб. научных трудов: Образование и наука, ПермГТУ. - 2001.- с.3-6.
6. Гончарук В.В. Очистка дренажных вод свалок твердых бытовых отходов баромембранными методами / В.В. Гончарук, М.Н. Балакина и др.//Химия и технология воды, 2006. - т. 28. - №5. –с. 462-471.
7. Степняк С.В. Методи очистки стоків зі сміттєзвалищ / Степняк С.В // Інформаційно-аналітичний збірник «Санітарна очистка міст та комунальний автотранспорт» – вип. 4 к. - 2002. – с.72-77.
8. Глушанкова И.С. Исследование возможности очистки фильтрационных вод полигонов захоронения ТБО методом озонирования / И.С. Глушанкова, А.Г. Миков, А.Б. Соломонов // Химия, технология, промышленная экология неорганических соединений. Пермь: ПТУ-2003. - №2. - с.12-15.

УДК 628.334.5:519.6

**Нагорная Е.К.**

*Государственное высшее учебное заведение*

*«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

### **ПАКЕТЫ ПРОГРАММ SETTLER ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

**Введение.** Оценка эффективности работы вертикальных отстойников на стадии проектирования комплекса очистных сооружений, когда рассматриваются различные варианты отстойников, варьируется их конструкция, габариты и т.п., осуществляется 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 [1-4] или на применении нуль-мерных (балансовых) моделей [5, 6]. Эти модели не позволяют учитывать гидравлический режим работы отстойника и его геометрическую форму. Поэтому создание математических моделей работы вертикальных отстойников, которые позволяли бы проектировщику оперативно получать необходимую

информацию с учетом формы очистных сооружений, режима их работы, особенностей массопереноса важная научная задача [3, 7].

Целью данной работы является описание двух пакетов программ Settler, которые дают возможность реализовать такой подход.

**Гидродинамическая модель.** Для расчета поля скорости водного потока в вертикальном отстойнике используется модель потенциального течения. В двухмерном случае моделирующее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0$$

где  $P$  - потенциал скорости.

В трехмерном случае моделирующее уравнение имеет вид

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

Компоненты вектора скорости водного потока определяются соотношением

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

Граничные условия для уравнения Лапласа рассматриваются в [8, 9].

Модель массопереноса транспорта примеси в вертикальном отстойнике описывается с помощью уравнения в двумерном случае

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

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;  $\sigma$  - коэффициент, учитывающий дополнительные процессы, происходящие в отстойнике, и влияющие на баланс концентрации (биореакции, флокуляция и агломерация частичек и хлопьев за счет турбулентности и др.).

Аналогично для трехмерного случая базовое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

где  $u, v, w$  - компоненты вектора скорости течения;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  - коэффициенты диффузии;  $w_s$  - скорость оседания загрязнителя.

Граничные условия для уравнения транспорта примеси рассмотрены в работах [8-15].

Расчет скорости осаждения примеси в отстойнике. Как известно, скорость осаждения примеси в отстойнике является одним из главных факторов в процесса массопереноса. Существуют различные имперические модели, которые используются для ее определения [8]. В данной работе используется два подхода при моделировании:

- первый подход – прямое задание скорости осаждения примеси, полученное,

например, экспериментально или определенное по формуле Стокса;

- второй подход – расчет скорости осаждения примеси по формуле Thomas & Vesilind [16]

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

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

Численное интегрирование моделирующих уравнений. Для численного интегрирования уравнений гидродинамики и массопереноса используется метод конечных разностей. Для расчета применяется прямоугольная сетка. В разработанном пакете программ имеется возможность изменять размер сетки. Форма отстойника задается с помощью маркеров [8].

Для численного интегрирования уравнения Лапласа используется метод Либмана (трехмерная задача) и метод суммарной аппроксимации (двухмерная задача). Для численного интегрирования уравнения массопереноса используется неявная попеременно-треугольная разностная схема [8].

Описание пакета программ. Для моделирования гидродинамики течения и массопереноса в вертикальных отстойниках на базе двухмерной модели (код Settler-2D) используются следующие подпрограммы:

- «SNLL» – расчет двухмерного уравнения Лапласа по методу Либмана;
- «SNLU» – расчет двухмерного уравнения Лапласа по методу суммарной аппроксимации;
- «SFFF» – расчет транспорта загрязнителя на первом шаге расщепления;
- «SFTT» – расчет транспорта загрязнителя на втором шаге расщепления;
- «SFFH» – расчет транспорта загрязнителя на третьем шаге расщепления;
- «SFFFD» – расчет транспорта загрязнителя на четвертом шаге расщепления;
- «SUV» расчет компонент вектора скорости на сторонах разностных ячеек;
- «SPR» вывод на печать результатов расчета.

Взаимодействие подпрограмм осуществляет основная программа. Ввод ис-

ходных данных для моделирования осуществляется с помощью файла начальных данных типа «DAT».

Функциональные возможности данного пакета. Settler-2D: возможность задания любой геометрической формы вертикального отстойника; возможность задания центральной трубы или комплекса труб, подающих сточных воды в отстойник; возможность задания пластин, перегородок и т.д. внутри отстойника; учет гравитационного осаждения примеси, турбулентной диффузии, процесса сорбции.

Процесс моделирования массопереноса в вертикальном отстойнике в трехмерном случае производится с помощью следующих подпрограмм:

- «SNL» – расчет трехмерного уравнения Лапласа по методу Либмана;
- «SFF» – расчет транспорта загрязнителя на первом и четвертом шаге расщепления;
- «SFT» – расчет транспорта загрязнителя на втором и третьем шаге расщепления;
- «SUVW» расчет компонент вектора скорости на гранях разностных ячеек;
- «SPR» вывод на печать результатов расчета.

Так же как и в двухмерном случае, взаимодействие подпрограмм осуществляет основная программа. Ввод исходных данных для моделирования осуществляется с помощью файла начальных данных типа «DAT».

Функциональные особенности данного пакета. Settler-3D: возможность задания любой геометрической формы вертикального отстойника; возможность задания центральной трубы или комплекса труб, подающих сточных воды в отстойник; возможность задания пластин, перегородок и т.д. внутри отстойника; возможность моделирования с учетом переменного значения скорости оседания загрязнителя в различных зонах отстойника.

Примеры расчетов. Возможности пакетов Settler проиллюстрированы на приведенных ниже рис. 1–5. На рисунках представлены расчетные значения концентрации загрязнителя в отстойнике при различных исходных данных. 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 [8].

На рис. 1 представлено распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с центральной трубой (скорость гравитационного осаждения загрязнителя  $w = 1,6$  м/ч, скорость входа  $11$  м/ч, коэффициент диффузии  $0,7$  м<sup>2</sup>/ч; параметр  $\sigma = 0$ ; длина отстойника  $8$  м; глубина -  $3,6$  м. Концентрация загрязнителя на входе в центральную трубу равна  $100$  ед. (в безразмерном виде).

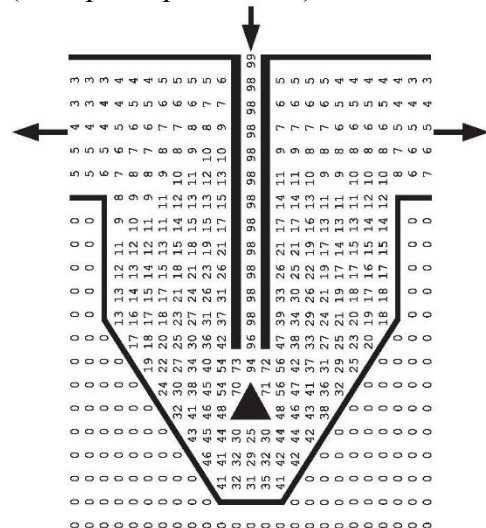


Рис. 1. Распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с центральной трубой

На рис. 2, 3 представлены результаты вычислительного эксперимента для вертикального отстойника с центральной трубой и присоединенными к ней одним и двумя дефлекторами. (скорость потока на входе в трубу  $21,7$  м/ч; коэффициент диффузии  $0,7$  м<sup>2</sup>/ч; скорость гравитационного осаждения загрязнителя  $w = 1,6$  м/ч; параметр  $\sigma = 0$ ; длина отстойника  $8$  м; глубина -  $3,8$  м; длина дефлектора  $1,5$  м; длина центральной трубы  $1$  м. Концентрация загрязнителя на входе в трубу  $100$  ед. (в безразмерном виде)). В данной задаче

исследуется влияние этих конструктивных особенностей на эффективность очистки воды и характер распределения загрязнений в отстойнике.

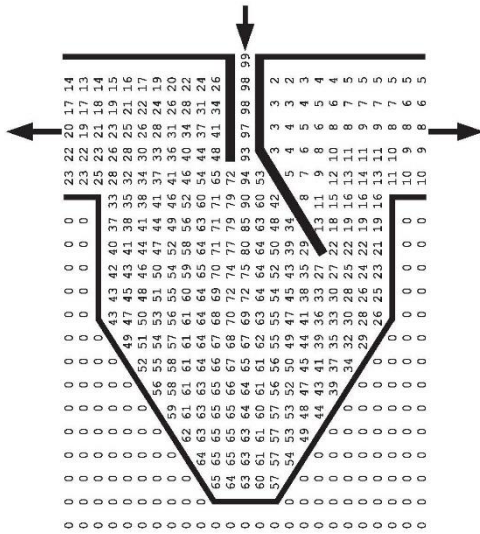


Рис. 2. Вертикальный отстойник с центральной трубой и одним дефлектором

На рис. 4 представлено распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с вертикальной перегородкой и водосливом. Изучалось влияние высоты водослива на эффективность очистки воды в отстойнике.

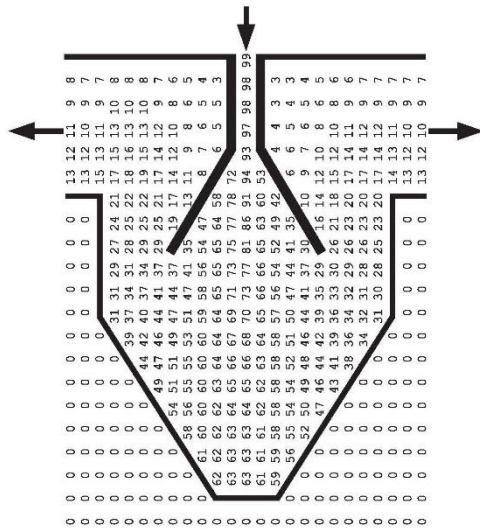


Рис. 3. Вертикальный отстойник с центральной трубой и двумя дефлекторами

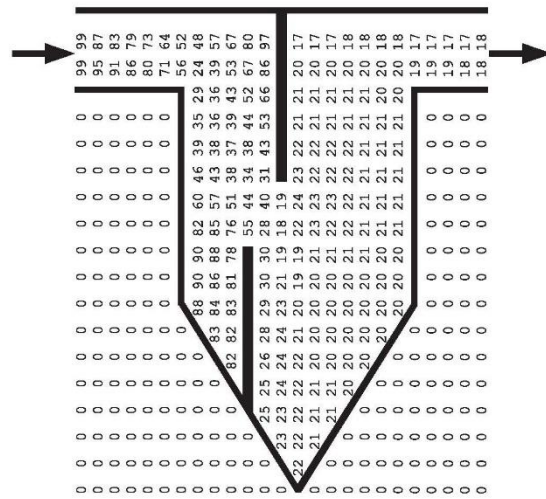


Рис. 4. Вертикальный отстойник с вертикальной перегородкой и водосливом (высота водослива 1,38 м).

На рис. 5 представлено распределение концентрации загрязнителя в вертикальном отстойнике с перегородкой и пластиной. Изучалось влияние положения пластины на интенсивность осветления воды.

Важно подчеркнуть наибольшие затраты компьютерного времени для расчетов одного варианта задачи. Так для двухмерного случая для расчета одного варианта потребовалось 5 с, а для расчета трехмерного варианта – 1–2 мин.

Такие минимальные затраты компьютерного времени очень важны при проведении серийных расчетов.

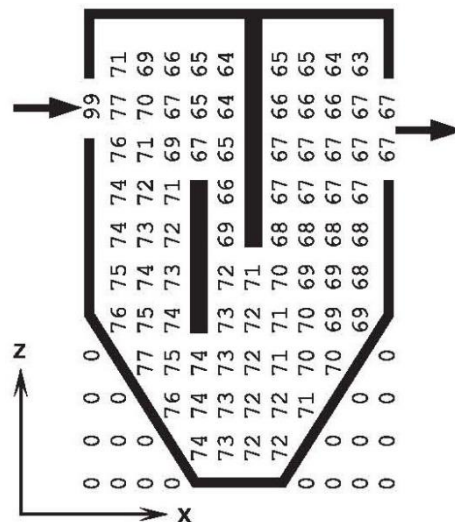


Рис. 5. Вертикальный отстойник с вертикальной перегородкой и пластиной

**Заключение.** В работе представлены новые пакеты программ Settler, позволяю-



щие моделировать гидродинамику течения и массопереноса в вертикальных отстойниках практически без ограничения на их форму. Особенностью пакетов является возможность оперативного получения расчетных данных.

Дальнейшее развитие пакетов программ следует производить в направлении разработки модуля, обеспечивающего расчет гидродинамики течения на базе моделей вязких течений.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. 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: науковий журнал. – К., 2004. – Т.6 (78), №4. – С. 62 - 67.
2. Holenda B. Development of modelling, control and optimization tools for the activated sludge process / Balazs Holenda Ph.D. Thesis // Doctorate School of Chemical Engineering University of Pannonia, 2007. - 155 p.
3. Plosz B. G. A critical review of clarifier modelling: 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 // In: Proceedings 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar (WWTmod2012). Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada, February 26-28, 2012. Canada, 2012. - P. 27-30.
4. 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. Gy. Plosz, J. De Clercq, I. Nopens, L. Benedetti, P. A. Vanrolleghem // Water Science and Technology. – Belgium, 2011. – 63(8). - P. 1726-1738.
5. 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.
6. Bürger R. A consistent modelling methodology for secondary settling tanks in wastewater treatment / R. Bürger, S. Diehl, I. Nopens // Water Research, 2011. - 45(6). - P. 2247-2260.
7. Griborio A. Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. A Dissertation: Doctor of Philosophy in The Engineering and Applied Sciences Program / Alonso G. Griborio. University of New Orleans, USA, 2004. – 440 p.
8. Беляев Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная // - Днепропетровск: Нова Ідеологія, 2012. – 112 с.
9. Нагорная Е. К. CFD-модель процесса массопереноса в вертикальном отстойнике / Е. К. Нагорная // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Науковий журнал. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – Вип. 1(43). – С. 39 – 50.
10. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
11. 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.
12. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. - М.: Мир, 1980. –616 с.
13. Бруязцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. - 443 с.
14. Stamou A.I. A 1-D model for secondary circular clarifiers / A.I. Stamou // Proc. of the Intern. Conference for the Restoration and Protection of the Environment V, Mykonos, Greece, 2004. – 8 p.
15. Kleine D. Finite element analysis of flows in secondary settling tanks [Электронный ресурс] / D. Kleine, B. D. Reddy // The work of the authors was supported by the Water Research Commission, and the National Research Foundation, of South Africa, 2003. – 35 p. Режим доступа к статье: <http://www.mth.uct.ac.za/~bdr/sst11Nov.pdf>
16. Jeppsson U. Modelling Aspects of Wastewater Treatment Process. Doctoral dissertation. Lund Institute of Technology, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation / Ulf Jeppsson. - Lund, Sweden, 1996. – 428 p.