

CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДКА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ

Введение. Отстойники широко используются при очистке воды. При этом в различных областях промышленности нашли широкое применение горизонтальные отстойники. С течением времени было разработано достаточно много конструкций таких отстойников. При создании той или иной конструкции ставилась задача достигнуть главную цель – повысить эффективность очистки воды. Анализ литературных источников показал, что при наличии значительного числа конструкций горизонтальных отстойников имеется одно «узкое» место в этой области – отсутствие универсальных методик расчета отстойников. Под понятием «универсальная методика» здесь понимается наличие такого инструмента расчета, который позволил бы проектировщику быстро выполнять расчет процесса оседания примеси в отстойнике без ограничения на его форму и наличие внутри отстойника различных элементов (пластины, перегородки и т.п.).

В настоящее время в Украине для расчета оценки количества осадка, который образуется в процесс эксплуатации горизонтальных отстойников, применяются эмпирические модели [3, 4, 6]. Эти модели нельзя назвать универсальными, т.к. они не учитывают геометрическую форму отстойника и гидродинамику течения в сооружении. Целью данной работы является разработка численной модели формирования осадка (CFD модель) в горизонтальном отстойнике, которая позволяет учитывать при моделировании геометрическую форму отстойника и его конструктивные особенности.

Математическая модель процесса формирования осадка в горизонтальном отстойнике

Расчет процесса формирования осадка на дне горизонтального отстойника разбивается на три этапа. На первом этапе

решается гидродинамическая задача – выполняется расчет поля скорости водного потока внутри отстойника (рис.1).

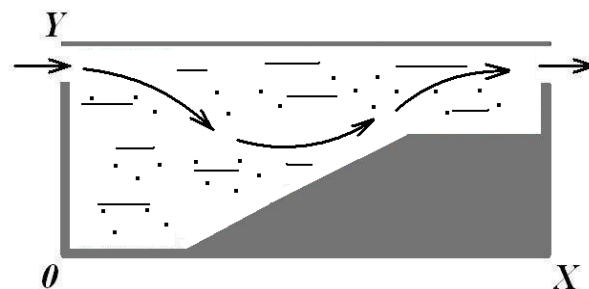


Рис. 1. Схема горизонтального отстойника.

Для решения этой гидродинамической задачи используется уравнение потенциального течения [1, 2, 7]

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

Граничные условия для данного уравнения рассмотрены в работе [1, 2]:

После расчета поля потенциала скорости внутри отстойника определяются компоненты вектора скорости потока внутри отстойника на основании соотношений [7]

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

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 [1, 2]

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

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;

σ – коэффициент, учитывающий процессы агломерации и т.п. в отстойнике.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [1].

На основе расчета поля концентрации примеси в отстойнике можно рассчитать процесс формирования, с течением времени, зоны осаждения осадка на дне отстойника. Для этого необходима информация о значении концентрации примеси в ячейках, прилегающих ко дну отстойника.

Для расчета процесса формирования осадка на дне отстойника, на каждом шаге по времени dt , используется следующая методология:

1. Рассчитывается масса примеси m_{exit} , которая осела за время dt в граничной ячейке

$$m_{exit} = w \cdot \Delta x \cdot 1 \cdot C_{ij} \cdot dt$$

где C_{ij} – концентрация примеси в граничной ячейке; w – скорость осаждения примеси

2. Рассчитывается масса примеси, которую может «вместить» приграничная ячейка

$$m_{full} = \rho \cdot W_{cell}$$

где $W_{cell} = \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1$ – объем приграничной разностной ячейки; ρ – плотность осадка.

3. Проводится сопоставление величин m_{exit} и m_{full} . Если выполняется условие

$m_{exit} = m_{full}$, то данная ячейка становится «твердой» стенкой (т.е. она полностью заполнена осадком) и выпадает из расчета. С помощью маркера меняется ее значение в численной модели. т.е. маркером задается новое значение твердой границы на дне отстойника. На представленных ниже рисунках (рис. 2 – 8) этот маркер обозначен «0» – твердая стенка. Таким образом, ячейки, помеченные маркером «0», «выпадают» из расчета за счет «заполнения» их осадком. На этих же рисунках маркером «1» отмечена зона течения, где выполняется расчет моделирующих уравнений.

4. Заново проводится расчет гидродинамики течения в отстойнике с учетом того, что изменилась граница расчетной области на дне отстойника за счет формирования

осадка (изменилась форма дна отстойника). После решения гидродинамической задачи решается задача массопереноса и повторяется расчет по определению массы примеси в приграничных ячейках на дне отстойника.

Метод решения. Формирование границ горизонтального отстойника и конструктивных особенностей внутри него на прямоугольной разностной сетке осуществляется с помощью метода маркирования [5]. Для численного интегрирования уравнения (1) используется метод А.А. Самарского [8]. Для численного интегрирования уравнения массопереноса (3) применяется неявная разностная схема [1, 2, 5]. Расчет неизвестных величин P и C осуществляется по методу бегущего счета в построенной CFD модели. Определив концентрацию примеси у дна отстойника, моделируется процесс формирования осадка.

Практическая реализация модели

На основе разработанной CFD модели создан код «Clarifier-P» с подпрограммой «Sludge», которая реализует методологию формирования осадка, реализованные на алгоритмическом языке FORTRAN.

Ниже, на рисунках, представлены результаты решения параметрической задачи по расчету формирования зоны осаждения внутри горизонтального отстойника. Расчет выполнялся в безразмерном виде. В качестве масштабов (размерные величины) выбраны: скорость потока на входе в отстойник V_{ex} ; длина отстойника L_x ; концентрация загрязнителя на входе в отстойник C_0 . Безразмерные значения параметров определялись так:

$$C = \frac{C_p}{C_0}, \quad \rho = \frac{\rho_p}{C_0}, \quad \mu = \frac{\mu_p}{V_{ex} \cdot L_x}, \quad t = \frac{t_p \cdot V_{ex}}{L_x},$$

где индексом «р» отмечена размерная величина. Расчет выполнялся при следующих безразмерных параметрах: $L_x=1$; $H=0,5$ (максимальная глубина в отстойнике); скорость осаждения примеси $w=0,05$; плотность осадка $1,72$; скорость на входе в отстойник $V_{ex}=1$; значение коэффициентов диффузии $0,7$.

Результаты расчета представлены на рис. 2 – 8.

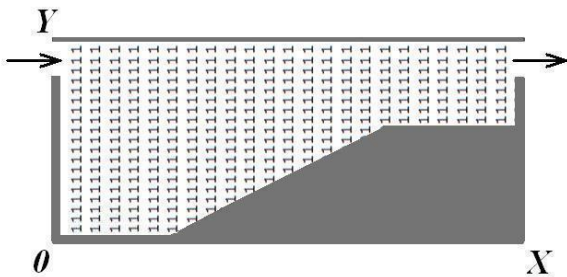


Рис. 2. Расчетная область в начальный момент времени ($t=0$, нет осадка на дне отстойника)

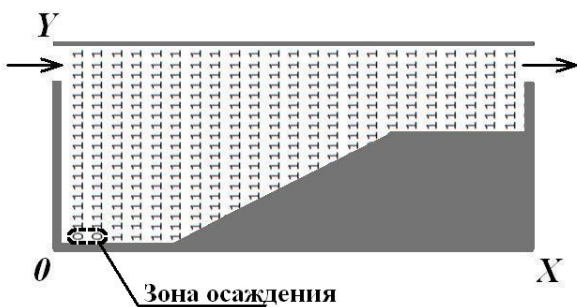


Рис. 3. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=0,35$ – время безразмерное)

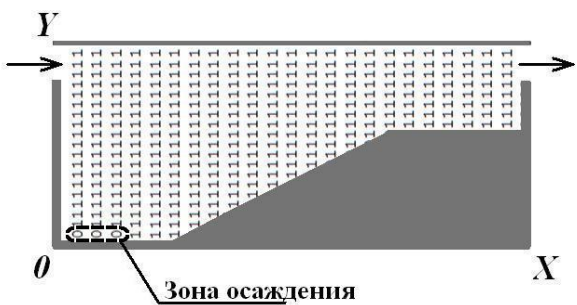


Рис. 4. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=1,05$ – время безразмерное)

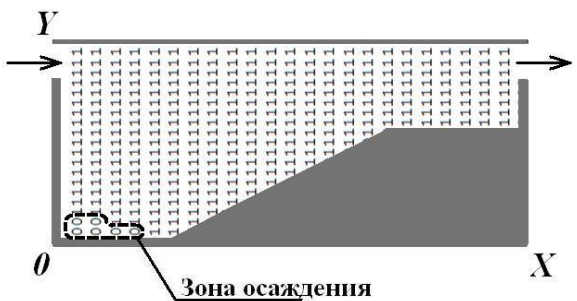


Рис. 5. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=2,3$ – время безразмерное)

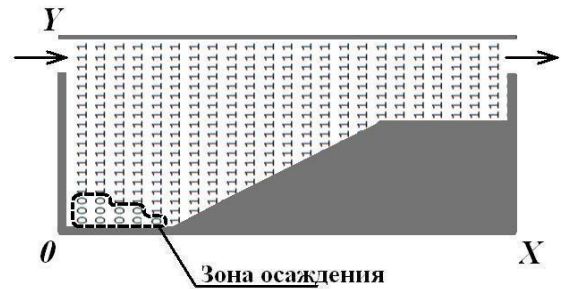


Рис. 6. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=2,65$ – время безразмерное)

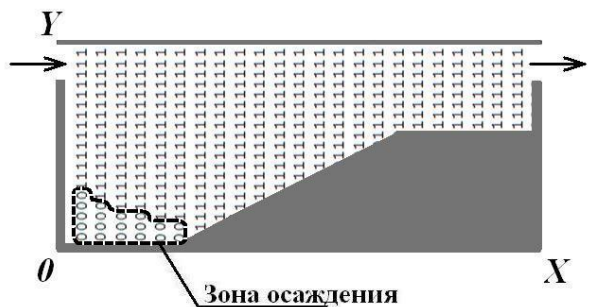


Рис. 7. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=4,3$ – время безразмерное)

Как видно из представленных рисунков, максимальная по высоте зона осаднения формируется в области, прилегающей к боковой стенке отстойника. Далее, высота зоны осаднения уменьшается. Эта тенденция просматривается для всех моментов времени. Например, если осадок не удалять из отстойника, то к определенному моменту времени зона отложения осадка примет вид как на рис. 8.

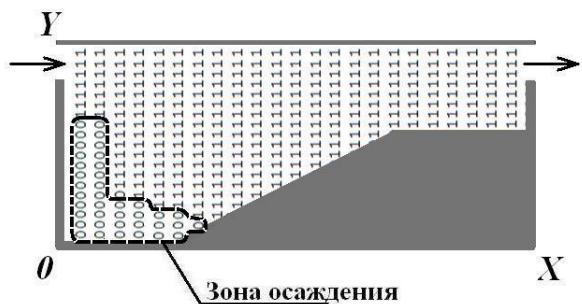


Рис. 8. Сформировавшаяся область осажденной примеси ($t=9,7$ – время безразмерное)

Зону осаднения осадка на рис.8 можно условно разбить на две подзоны: первая подзона – имеет вид «столба», и формируется непосредственно возле боковой

стенки; вторая подзона – примыкает к первой и по форме напоминает «склон холма». Из данного рисунка видно, что к этому моменту времени начинает формироваться зона отложения на наклонном участке дна отстойника. Очевидно, что в реальности такая зона не сможет образоваться в силу того, что осадок будет своевременно удален. Приведенный результат является иллюстрацией возможности разработанной численной модели для экспресс-прогноза формирования зоны осадка, его размеров и положения.

Следует отметить, что недостатком разработанной методологии является то, что в ней не учитывается процесс движения зоны осаждения относительно отстойника, поскольку, уравнения движения осадка не включены в разработанную численную модель.

Выводы. В работе представлена новая CFD модель расчета процесса формирования осадка в горизонтальном отстойнике. Модель дает возможность рассчитывать процесс формирования осадка с помощью компьютеров малой и средней мощности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Беляев Н.Н., Нагорная Е.К. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения / Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная. – Д.: Нова ідеологія, 2012. – 112 с.
2. Беляев Н.Н. CFD моделирование работы горизонтального отстойника со струенаправляющими пластинами / Беляев Н.Н., Козачина В.А. Вода та водоочисні технології. Науково-технічні вісті. №2 (15), 2014.
3. Василенко О.А., Епоян С.М. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки: Навчальний посібник. – Київ – Харків, КНУБА, ХНУБА, ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.
4. Епоян С.М., Колотило В.Д. та ін. Водопостачання та очистка природних вод: навчальний посібник. – Х.: Фактор, 2010. – 192 с.
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. Ласков Ю.М., Воронов Ю.В., Калицун В.И. Примеры расчетов канализационных сооружений: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1981. – 232 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. – 735 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.