

### 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

в пруды-накопители после откачки из карьеров или шахт) рассматривается проект отвода этих вод в акваторию Черного моря. В рамках этой сложной экологической задачи необходимо рассчитать процесс рассеивания шахтных вод в море. Но хорошо известно, что на формирование зоны загрязнения в акватории большое влияние оказывает тип выпускного устройства, через которое осуществляется такой сброс. В настоящей работе рассматривается моделирование работы сбросного устройства - водовыпуска шахтных вод нового типа.

Схема водовыпуска показана на рис. 1. Данное устройство представляет собой канал, в торцевую часть которого входит морская вода («основной поток»), а с боку канала располагается отверстие, через которое в канал поступает шахтная вода («боковой впрыск»). Суммарный поток выходит через диффузор. Таким образом, в данном водовыпуске, еще до поступления шахтных вод в акваторию моря, внутри сбросного устройства происходит *начальное* разбавление шахтных вод и на выходе из устройства в акваторию поступают уже сточные воды с меньшей концентрацией загрязнителя.

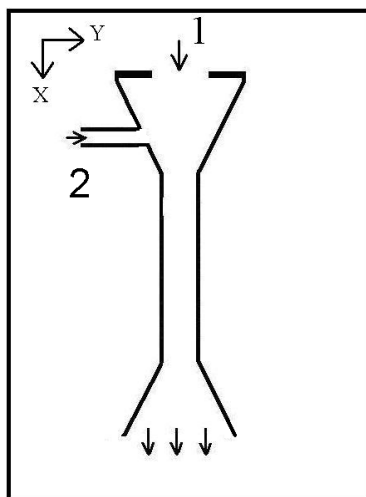


Рис. 1. Схема устройства (водовыпуска) для сброса шахтных вод в море:  
1 – вход для морской воды; 2 – вход для шахтных вод

Целью данной работы является расчет процесса смешения шахтных вод и морской воды внутри водовыпуска с целью определения степени разбавления шахтных вод внутри сбросного устройства.

**Математическая модель.** Процесс разбавления шахтных вод внутри водовыпуска рассчитывается на базе осредненного по высоте устройства уравнения переноса примеси [1, 2, 3, 4]

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

где  $C$  – концентрация загрязнителя в воде;  $u, v$  – компоненты вектора скорости течения;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты диффузии;  $t$  - время.

В 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 входной границе (граница входа потока шахтных вод и потока морской воды) ставится условие:

$$C|_{\text{граница}} = C_E,$$

где  $C_E$  - известное значение концентрации загрязнителя. Для потока морской воды имеем  $C_E=0$ .

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 устройства.

В начальный момент времени полагается  $C = 0$  внутри водовыпуска.

Для расчета поля скорости водной среды внутри водовыпуска при взаимодействии потока морской воды с потоком шахтных вод используется модель потенциального течения. В этом случае базовое уравнение имеет вид [5,6]

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

где  $P$  - потенциал скорости.

Для данного уравнения ставятся следующие граничные условия [6]:

- на твердых стенках водовыпуска:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ , где  $n$  - единичный вектор внешней нормали к твердой границе;

- на входной границе (зона втекания морской воды или шахтных вод в водовыпуск):  $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ , где  $V_n$  - известное значение скорости втекания;

- на выходной границе расчетной области (область выхода воды из водовыпуска)  $P = P^*(x = const, y) + const$  (условие Дирихле).

Компоненты вектора скорости потока внутри водовыпуска рассчитываются зависимостями [5, 6]

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

**Метод решения.** Для численного интегрирования уравнений модели используется ортогональная разностная сетка. Геометрическая форма водовыпуска, положение отверстия для ввода морской воды, отверстия для ввода шахтных вод задаются в численной модели с помощью метода «фиктивных ячеек». Для численного интегрирования уравнения переноса примеси (1) используется неявная разностная схема расщепления [1, 2, 3]. Численное интегрирование уравнения для потенциала скорости проводится с использованием идеи установления решения по времени и с применением попеременно треугольного метода А. А. Самарского [7].

**Практическая реализация модели.** Расчет водовыпуска проведен для следующих исходных данных: ширина входной части для морской воды – 0,6 м; длина конфузора – 0,8 м; ширина и длина прямолинейного участка – 0,4 м и 1,8 м соответственно; ширина входного отверстия для морской воды – 0,15 м; длина диффузора – 0,7 м; ширина выходной части водовыпуска – 1,3 м. Рассматриваются два варианта режима сброса: первый вариант - скорость входа морского потока в водовыпуск - 3 м /с, скорость входа шахтных вод 1 м /с; а второй вариант - скорость входа морского потока в водовыпуск - 2,5 м /с, скорость входа шахтных вод 0,5 м /с, коэффициент диффузии по обоим координатным направлениям равен 0,2 м<sup>2</sup>/с. Концентрация загрязнителя во входящем потоке шахтных вод равна 100 ед (в безразмерном виде).

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рис. 2. и рис. 3. Данные результаты представлены в виде матрицы – значения концентрации загрязнителя в расчетных точках. Здесь величина концентрации приведена в безразмерном виде: каждое число – это значение концентрации примеси в процентах от величины входной концентрации в потоке шахтных вод. Печать чисел осуществляется по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. То есть, если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «1,87 %» от концентрации на входе в водовыпуск, то на печать будет выведено число «1». Такое представление результатов вычислительного эксперимента дает возможность оперативно определять интенсивность разбавления сточных вод внутри водовыпуска.

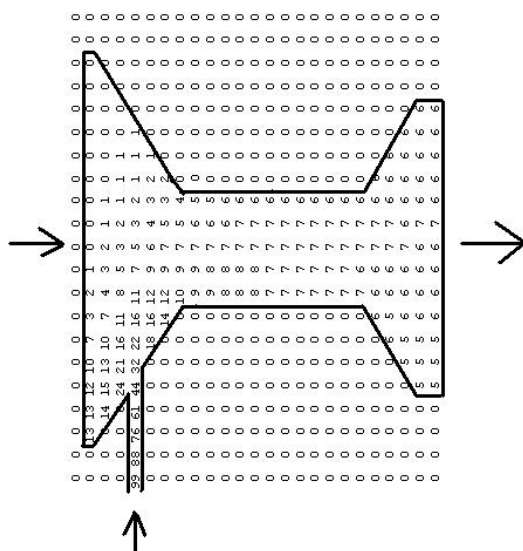


Рис. 2. Распределение концентрации загрязнителя внутри водовыпуска (первый вариант режима сброса)

Видно, что внутри водовыпуска, происходит интенсивное разбавление примесей, содержащихся в шахтных водах. Так концентрация примеси на выходе из водовыпуска составляет величину порядка 5 -7 % от исходной концентрации в подаваемых на утилизацию шахтных водах – для первого варианта режима сброса и порядка 4 – 5 % для второго варианта режима сброса.

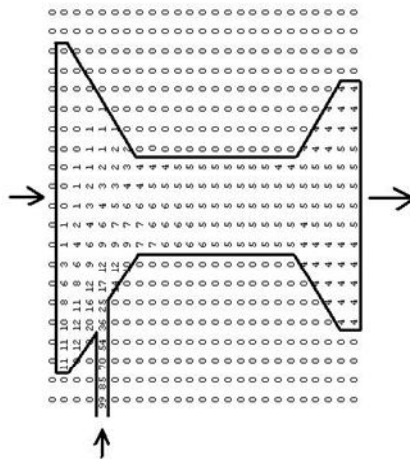


Рис. 3. Распределение концентрации загрязнителя внутри водовыпуска (второй вариант режима сброса)

Таким образом, водовыпуск рассматриваемого типа дает возможность снизить концентрацию примеси в сточных водах перед их выходом в акватории моря.

В заключение следует подчеркнуть, что для расчета одного варианта задачи потребовалось 10 с компьютерного времени.

**Выводы.** В работе рассмотрена численная модель для расчета процесса разбавления шахтных вод внутри водовыпуска нового типа. Построенная модель позволяет рассчитывать процесс разбавления с учетом геометрической формы сбросного сооружения. Дальнейшее развитие настоящей работы следует проводить в направлении создания 3D модели процесса разбавления шахтных вод внутри водовыпуска.

#### Список литературы

1. Антошкина Л. И. Численное моделирование процессов загрязнения поверхностных и подземных вод / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Зыонг Нгуен Суан, Е. Д. Коренюк. – Д.: Из-во Свидлер А. Л., 2004.-167 с.
2. Антошкина Л. И. Математические модели в задачах водопользования / Л. И. Антошкина, В. М. Багрий, Н. Н. Беляев, И. И. Дудникова, Е. Д. Коренюк. - Д.: Из-во Грек А. С., 2006. -168 с.
3. 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.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости / М.: Наука, 1979.-536 с.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. - М. : Наука, 1978. – 735 с.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. - М. : Наука, 1983. – 616 с.

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