

РАСЧЕТ ЗОНЫ АВАРИЙНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ

На базі моделі потенціальної течії та моделі переносу домішки виконано прогноз забруднення річки у випадку аварійного скиду забруднення в акваторію. Наведено результати обчислювального моделювання.

На базе модели потенциального течения и модели переноса примеси выполнен прогноз загрязнения реки в случае аварийного сброса загрязнителя в акваторию. Представлены результаты численного моделирования.

The 2D numerical model was used to simulate the pollutant dispersion in river after an accident. The model is based on the equation of potential flow and the transport model. The numerical modeling results are presented.

Введение

Интенсивное загрязнение рек может быть вызвано сбросом различных загрязняющих веществ при чрезвычайных ситуациях (прорыв канализационных сетей, разрушение ГЭС и т.д.). Такие ситуации создают угрозу масштабного загрязнения акватории рек и водозаборов. Специфической особенностью ряда участков реки Днепр является расположение вблизи нее отстойников с промышленными отходами, в том числе радиоактивными. Чрезвычайные ситуации на этих объектах могут привести к такому загрязнению акватории Днепра, что будет эквивалентно катастрофе. В этой связи возникает актуальная задача прогноза загрязнения акватории рек в случае чрезвычайных ситуаций на объектах подобного типа. Применение физического эксперимента (моделирование в гидравлических лотках и т.п.) требует много времени на изготовление модели, постановку и проведение эксперимента, а также на обработку экспериментальных данных. Кроме этого, проведение физического эксперимента требует использования дорогостоящего оборудования, которое может позволить себе не каждая лаборатория. Поэтому физический эксперимент не может служить каждодневным инструментом решения прогнозных задач рассматриваемого класса. Использование аналитических моделей для прогноза загрязнения акватории рек ограничено тем, что данные модели не позволяют учесть, в первую очередь, особенности русла: геометрическую форму берегов, наличия островов, заливов и т.д. В этой связи, актуальной задачей является разработка эффективных численных моделей прогноза загрязнения водотока при чрезвычайных ситуациях.

Целью данной работы явилась разработка численной модели загрязнения акватории реки Днепр (участок водотока *Днепродзержинск–Днепропетровск*), где на острове имеется от-

стойник с промышленными отходами. Ставится задача прогноза динамики развития зоны загрязнения акватории в случае чрезвычайной ситуации на отстойнике, в результате которой загрязненные стоки начнут поступать в акваторию реки Днепр.

Математическая модель

При расчете процесса загрязнения акватории реки необходимо первоначально рассчитать поле скорости водного потока, а на втором этапе – решить задачу о транспорте загрязнителя по руслу.

На первом этапе для расчета поля скорости потока используется уравнение для потенциала скорости [2]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) проводится при таких граничных условиях [2]:

- на твердых стенках $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали;
- на входной границе (границы втекания потока) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости втекания;
- на выходной границе $P = P^*(x = \text{const}, y) + \text{const}$ (условие Дирихле).

В рамках модели потенциального течения компоненты вектора скорости потока связаны с величиной потенциала скорости зависимостями

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

Определив компоненты вектора скорости водного потока на первом этапе вычислительного эксперимента, можно перейти к решению

транспортной задачи. На этом этапе для расчета рассеивания загрязнителя в русле реки применяется уравнение переноса примеси, осреднённое по глубине реки [1, 2, 4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i),$$

где C – концентрация загрязнителя (в случае радиоактивного загрязнения – объемная активность) в русле реки; u, v – компоненты вектора скорости течения в русле; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса загрязнителя из отстойника в акваторию реки; $\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника выброса; σ – коэффициент, учитывающий распад загрязнителя, оседание его на дно, взаимодействие с донными отложениями; t – время.

Таким образом, поступление стоков в акваторию реки моделируется точечным источником известной интенсивности.

В работах [2 – 4] рассмотрена постановка краевых условий для уравнения переноса.

В данной работе для решения задачи используются конечно-разностные методы в сочетании с методом маркирования расчетной области [2]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке, а положение твердых границ (острова и т.д.) задается с помощью маркеров. С помощью такого подхода можно быстро изменять форму расчетной области, что дает возможность применять разработанный код для моделирования гидродинамического процесса переноса примеси для различных участков водотока, не внося изменений в код, а изменяя только файл исходных данных. Применение метода маркирования дает возможность формировать в дискретной модели любую форму русла водоема.

Метод решения

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости используется метод установления решения по времени. В этой связи интегрирование проводится для уравнения вида

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

где t – фиктивное время.

При $t \rightarrow \infty$ решение уравнения (2) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (1).

Для численного интегрирования уравнения (2) используется неявная схема условной аппроксимации [6]. В этом случае разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

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

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

Отметим, что схема является неявной, но расчет значения потенциала скорости $P_{i,j}$ в каждой разностной ячейке на каждом шаге расщепления осуществляется по явной формуле – методу бегущего счета [3]. Это позволяет создать эффективный алгоритм расчета в многосвязных областях и областях сложной геометрической формы, каковыми являются русла рек.

После расчета величины потенциала скорости компоненты вектора скорости рассчитываются по соотношениям:

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

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

Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно-треугольная разностная схема [3]. При применении этой разностной схемы процесс решения уравнения переноса расщепляется на четыре шага. Разностные уравнения в операторном виде записываются так [3]:

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

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \\ & + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

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

$c = n + \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l;$$

- на третьем шаге расщепления $k = n + \frac{3}{4}$;

$$c = n + \frac{1}{2};$$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l;$$

- на четвертом шаге расщепления $k = n + 1$;

$$c = n + \frac{3}{4};$$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l.$$

Пояснение к данным разностным операторам приведено в работе [2]. Из данных выражений можно получить явные формулы для определения неизвестного значения концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления.

Практическая реализация модели

На основе построенной численной модели разработан код «RIVER_2» на алгоритмическом языке FORTRAN. Разработанный код был применен для решения следующей задачи. Рассматривается участок в акватории реки Днепр, где расположен остров, а на острове находится отстойник с промышленными стоками (рис. 1). Предполагается, что в случае чрезвычайной ситуации в акваторию реки начинают поступать жидкие отходы. На рис. 1 место аварийного сброса отходов показано кружком. Направление течения показано стрелками. Ставится задача прогноза динамики развития зоны загрязнения реки. Известно, что на реке Днепр расположен каскад плотин, а значит, регулируя сброс на плотинах, можно уменьшить скорость течения на том или ином участке водотока в случае аварии. Поэтому расчет был выполнен при малой скорости течения, что моделировало ситуацию, когда сброс воды на плотинах был уменьшен. Расчет выполнен при следующих исходных данных: размеры расчетной области: длина – 5400 м, ширина – 4380 м, средняя скорость потока на входе в расчетную область –

0,01 м/с. Коэффициент диффузии по обоим координатным направлениям равен 0,7 м²/сек. Коэффициент σ равен нулю, т.к. рассматривается процесс загрязнения акватории реки за короткий промежуток времени после возникновения аварийной ситуации. Полагаем, что загрязненные сточные воды поступают с острова в реку с интенсивностью 100 ед/с (в безразмерном виде), аварийный сброс происходит в течении 5,5 часов, средняя глубина потока на рассматриваемом участке русла порядка 5...6 м.

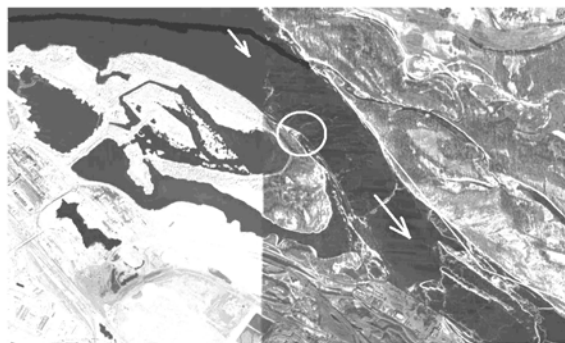


Рис. 1. Форма расчетной области

На рис. 2 – 4 показана динамика загрязнения акватории реки для различных моментов времени. Как видно из данных рисунков, зона загрязнения разбивается на две части. Одна часть движется вдоль русла, а другая часть огибает остров и проникает в затоку между островом и правым берегом реки Днепр. Отчетливо видно, что с течением времени эта затока полностью подвергается загрязнению. С экологической точки зрения можно считать, что данная затока «выполнит» защитную функцию, поскольку та часть загрязнителя, которая в нее попадет, не будет участвовать в возможном загрязнении водозаборов, расположенных вниз по реке.

Был проведен вычислительный эксперимент по оценке влияния еще меньшей скорости течения на динамику развития зоны загрязнения. Полагалось, что через промежуток времени 3,6 часа изменилась скорость течения на рассматриваемом участке водотока (за счет регулирования сброса на плотинах), и средняя скорость течения составила 0,003 м/с. Результаты данного вычислительного эксперимента показаны на рис. 5, 6. Эти рисунки необходимо сравнить с рис. 2 и рис. 3. Видно, что уменьшение скорости течения в русле привело к снижению темпа развития зоны загрязнения, и в частности, уменьшилась длина зоны загрязнения вдоль русла.

В заключение отметим, что для расчета задачи потребовалось около 30 с компьютерного времени.



Рис. 2. Изолинии концентрации загрязнителя через 13,3 ч после возникновения чрезвычайной ситуации



Рис. 3. Изолинии концентрации загрязнителя через 26,6 ч после возникновения чрезвычайной ситуации



Рис. 4. Изолинии концентрации загрязнителя через 56,6 ч после возникновения чрезвычайной ситуации

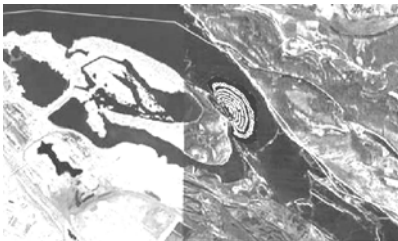


Рис. 5. Изолинии концентрации загрязнителя через 13,3 ч после возникновения чрезвычайной ситуации (уменьшилась скорость течения в русле)

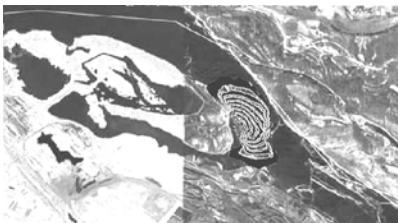


Рис. 6. Изолинии концентрации загрязнителя через 26,6 ч после возникновения чрезвычайной ситуации (уменьшилась скорость течения в русле)

Выводы

В работе рассмотрено применение разработанной численной модели для расчета процесса загрязнения водотока р. Днепр при поступлении загрязнителя из хранилища, расположенного на острове. Выявлена динамика загрязнения акватории реки. Вычислительный эксперимент показал, что значительному загрязнению подвергнется затока возле острова. Для уменьшения скорости распространения зоны загрязнения в акватории реки после аварии следует уменьшить скорость течения в русле реки путем уменьшения сброса воды на плотинах, расположенных по руслу. Дальнейшее совершенствование созданной модели следует проводить в направлении ее разработки для расчета рассеивания загрязнителя в трехмерной постановке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование процессов загрязнения поверхностных и подземных вод [Текст] / Л. И. Антошкина и др. – Д.: Изд-во ЧП Свидлера А. Л., 2004. – 168 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
4. Основа прогнозирования качества поверхностных вод [Текст]. – М.: Наука, 1982. – 181 с.
5. Савенко, В. Я. Математическая модель механизма поперечной циркуляции в открытых потоках при неизотропных коэффициентах турбулентной вязкости [Текст] / В. Я. Савенко, Е. С. Славинская // Вестник ХГАДТУ. – Вып. 7. – X., 1998. – С. 50-53.
6. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
7. Шеренков, И. А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков [Текст] / И. А. Шеренков. – М.: Энергия, 1978. – 240 с.
8. Мокін, Б. Б. Математичні моделі для контролю та управління якістю річкових вод / Б. Б. Мокін. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 172 с.

Поступила в редколлегию 12.01.2010.
Принята к печати 20.01.2010.