

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ПРИ АВАРИЙНОМ СХОДЕ ЦИСТЕРН

Розроблена математична модель розрахунку динаміки забруднення р. Дніпро при аварійному скиді забруднювача. Модель базується на двовимірних рівняннях річної гідравліки та рівнянні міграції домішки. Наведені результати чисельного моделювання забруднення акваторії при сході залізничних цистерн з мосту.

Разработанная математическая модель расчета динамики загрязнения р. Днепр при аварийном сбросе загрязнителя. Модель базируется на двумерных уравнениях речной гидравлики и уравнении миграции примеси. Приведенные результаты численного моделирования загрязнения акватории при сходе железнодорожных цистерн с моста.

A mathematical model to calculate pollution of the Rivers Dnipro and Samara after an emergency discharge of a pollutant has been developed. The model is based on 2D equations of annual river hydraulics and the impurity transfer equation. The results of numeral simulation of pollution of the rivers' area after derailment of railtanks from the bridge are presented.

Введение

В последнее время повышенный интерес представляет прогноз качества воды в реках в случае аварийных сбросов в них различных токсичных веществ (ТВ). Попадание ТВ в реку может быть вызвано авариями на промышленных объектах (разрушение хранилищ, трубопроводов), а также при транспортировке их различными видами транспорта [1]. Необходимо отметить, что интенсивное загрязнение реки, соизмеримое с крупной аварией на производстве, могут вызвать аварии при транспортировке ТВ железнодорожным транспортом. Загрязнение реки в этом случае может произойти либо при стоке ТВ с поверхности земли, при фильтрации ТВ с поверхности земли вниз – до подземного потока, а далее в водоем при разгрузке в него подземного потока, или при непосредственном, прямом попадании ТВ в реку, например, при сходе и разрушении цистерн с моста. Необходимо отметить, что прямой сток ТВ в реку приводит сразу к наиболее интенсивному загрязнению реки. В этом случае важной задачей является прогноз динамики загрязнения воды в реке для решения следующего комплекса задач:

- Когда фронт загрязненных вод дойдет до экологически значимых объектов, расположенных вниз по течению.
- Как будет изменяться с течением времени интенсивность загрязнения воды в реке вблизи экологически – значимых объектов (водопой, пляжи и т. п.).

- Создается ли угроза загрязнения водозаборов, когда необходимо прекратить забор воды из реки и когда можно возобновить подачу.
- Создается ли угроза попадания ТВ на участок акватории реки, принадлежащий другому государству, и если да – то какова будет вероятность загрязнения этого участка акватории.

В основе решения этого комплекса задач лежит задача расчета миграции ТВ в реке. Необходимо отметить, что решение поставленной задачи осуществляется в два этапа:

- расчет гидродинамики течения и определение поля скорости в русле;
- расчет процесса миграции загрязняющего вещества в реке.

Значительный интерес представляет оценка последствий аварийных сбросов вредных веществ в крупные реки, которые повсеместно на Украине являются источниками водоснабжения. Многие промышленные центры, города расположены на их берегах, поэтому внезапное интенсивное загрязнение реки способно вызвать крайне негативные последствия. Город, промышленные объекты, спасательные службы могут быть не готовы к внезапной аварийной ситуации, вызвавшей интенсивное загрязнение акватории. Интерес к прогнозированию загрязнения крупных водных артерий (в первую очередь – р. Днепр) на Украине возрос после Чернобыльской катастрофы. В настоящее время уже целесообразно создавать математические/

компьютерные модели прогноза состояния акватории реки, прилегающей к крупному индустриальному центру, в случае внезапной крупной аварии (то есть «проигрывать» на модели всевозможные ситуации, исходя из статистики аварий, крупных железнодорожных катастроф, и тем самым разрабатывать научно-обоснованную стратегию реагирования на штатную ситуацию).

Традиционным подходом при расчете гидродинамики течения является использование одномерных уравнений речной гидравлики, занесенных в той или иной форме [1–4]. Однако на участке акватории реки, прилегающей близко к месту аварийного сброса, для получения надежных прогнозных данных необходимо учитывать геометрическую форму русла реки, наличие протоков, островов, влияющих на формирование поля скорости в русле [5–7]. Решение гидродинамической задачи с учетом таких особенностей значительно усложняет алгоритм. Поэтому для проведения серийных расчетов необходима разработка достаточно универсальных моделей, с одной стороны, и не требующих значительных затрат машинного времени «при практической реализации» – с другой стороны. **Целью** настоящей работы является разработка компьютерной модели прогноза уровня загрязнения реки Днепр при аварийном сбросе вредных веществ на железнодорожном мосту № 1 (г. Днепропетровск), позволяющей осуществлять расчет поля скорости в русле с достаточной степенью детализации особенностей, которые оказывают влияние на гидродинамику течения.

1. Математическая модель гидродинамики течения в русле реки

При расчете скорости водного потока в реке очень важно воспроизводить на модели такие важные элементы как геометрия берегов (наличие мысов, заливов), островов, которые оказывают определяющее влияние на формирование поля скорости. В работе [5] рассмотрено построение модели течения в реке с учетом описанных особенностей на базе уравнений Навье-Стокса, записанных в переменных «завихренность–функция тока». Однако при расчете течений в русле при наличии островов для реализации этой модели необходима дополнительная расчетная процедура, с целью определения значения функции тока на островах. В данной работе для расчета поля скорости используется система уравнений, записанная в

физических переменных, в рамках теории мелкой воды:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial(u^2 + P)h}{\partial x} + \frac{\partial uvh}{\partial y} = \\ = hv \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial uvh}{\partial x} + \\ + \frac{\partial(v^2 + P)h}{\partial y} = hv \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \end{aligned}$$

где h – уровень свободной поверхности воды, P – среднее давление воды по глубине водоема.

В правой части данных уравнений записаны слагаемые, соответствующие трению между слоями течения в горизонтальном направлении.

В модели мелкой воды при относительно небольших скоростях течения можно допустить, что давление P мало отличается от гидростатического

$$P = P_a + \rho g(h - z),$$

где P_a – давление на свободной поверхности, координата $z = 0$ соответствует дну водоема. Среднее давление в выбранном сечении равно

$$P = \rho \frac{g h^2}{2}.$$

Если при течении в водоеме уровень свободной поверхности h мало изменяется, то можно положить $h = \text{const}$ и установить аналогию с течением несжимаемой жидкости. Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [6].

2. Математическая модель переноса примеси в реке

На основе численного решения системы уравнений гидродинамики определяется поле скорости водного потока u, v . Для описания процесса переноса примеси в реке используется осредненное по глубине уравнение миграции [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \sigma \varphi = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \left(\mu_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \\ + \sum q_i(t) \delta(r - r_i), \end{aligned}$$

где φ – концентрация загрязняющего вещества; u, v – компоненты вектора скорости; σ – коэффициент, учитывающий процессы химического разложения загрязнения, осаждение; μ_x, μ_y – коэффициент турбулентной диффузии; q_i – интенсивность точечных источников загрязнения; $r_i = (x_i, y_i)$ – месторасположения точечных источников загрязнения; $\delta(r-r_i)$ – дельта-функция Дирака; t – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [5].

3. Метод решения

Численное интегрирование уравнений модели расчета динамики течения в русле и переноса примеси по руслу реки осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Численное интегрирование проводится с использованием явной разностной схемы расщепления [5; 6]. Это позволяет построить эффективный алгоритм расчета, позволяющий проводить интегрирование уравнений в областях сложной геометрической формы с учетом таких особенностей как острова и т. п.

4. Результаты моделирования

На основе рассмотренной модели и разработанных разностных схем [5; 6] создан алгоритм и пакет программ «ПОТОК 2» для расчета переноса вредных веществ в реке после аварийного сброса. Ниже представлены результаты моделирования загрязнения р. Днепр при аварийном попадании серной кислоты в случае аварийного схода цистерн на железнодорожном мосту через р. Днепр (мост номер № 1, г. Днепропетровск).

В сценарии аварии полагалось, что утечка кислоты из цистерны в реку проходила в течение 10 часов, интенсивность выброса $q = 1$ (в безразмерном виде). На рис. 1–4 показана зона загрязнения р. Днепр (изолинии концентрации кислоты) для четырех моментов времени. Видно, что через 5 часов после аварии шлейф загрязненной воды продвинется дальше о. Зеленый. Через 15 часов – шлейф достигнет о. Монастырский (экологически значимая зона). Через 25 часов – шлейф попадет на участок акватории, где на формирование гидродинамики потока оказывает влияние приток р. Днепр – р. Самара.



Рис. 1. Зона загрязнения р. Днепр через 5 часов после аварии

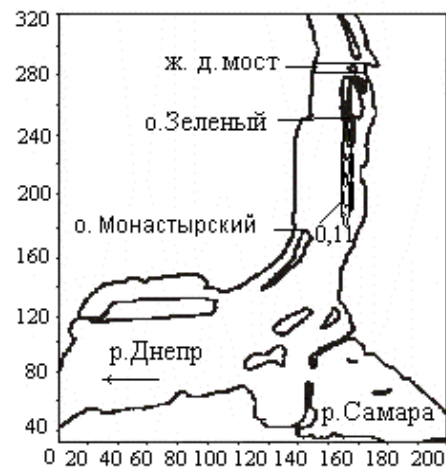


Рис. 2. Зона загрязнения р. Днепр через 15 часов после аварии

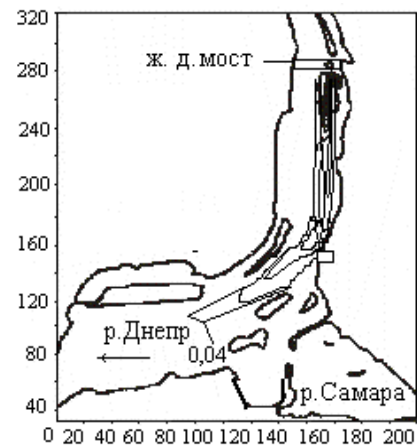


Рис. 3. Зона загрязнения р. Днепр через 25 часов после аварии

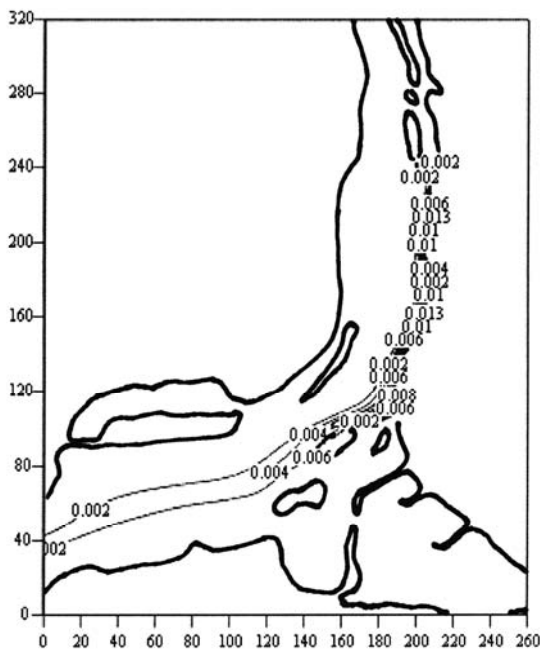


Рис. 4. Зона загрязнения р. Днепр через 125 часов после аварии

На рис. 5 показана зависимость концентрации загрязнителя от времени на участке р. Днепр (точка В, на рис. 1), где осуществляется забор воды насосной станцией I подъема фильтровальной станцией, обеспечивающей водой ж.-д. станцию Нижнеднепровск-Узел. Данные результаты позволяют определить время, когда необходимо отключить водозабор с целью предотвращения попадания загрязнителя в систему питьевого и промышленного водоснабжения.

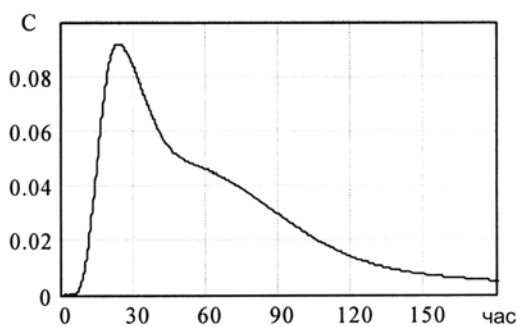


Рис. 5. Зависимость безразмерного значения концентрации загрязнителя в реке в месте водозабора

Выводы

Предложенная модель может служить элементом системы мониторинга участка акватории р. Днепр вблизи крупного промышленного узла – г. Днепропетровска. Модель является эффективной, поскольку позволяет учесть детали, оказывающие влияние на процесс переноса примеси по руслу. Совершенствование модели необходимо проводить путем создания прогнозной базы данных для нее и решения комплекса задач по загрязнению акватории при наиболее типовых, потенциальных авариях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атавин А. А., Васильев О. Ф., Воеводин А. Ф. Методы расчета нестационарных уравнений речной гидравлики // Численные методы в гидравлике и гидродинамике. – Донецк: Дон ГУ, 1994. – С. 114.
2. Большаков В. А., Клещевникова Т. П. Исследование результатов расчетов неустановившегося движения ливневых вод в руслах с большим уклоном дна // Гидравлика и гидротехника. – К.: Техніка. Вип. 14. – 1972. – С. 9–15.
3. Клименко О. А., Быстов А. В., Геков В. Ф. Оперативный прогноз распространения в водотоках зон опасного аварийного загрязнения // Гидрохимические материалы. – 1991. – Т. 100 – С. 93–1136.
4. Кюнж Ж. А., Холли Ф. М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 255.
5. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. – К.: Наукова думка. – 1997. – 368 с.
6. Зьонг Н. С. Численное моделирование течения воды на участке русла реки с переменной глубиной // Вісник Дніпропетровського університету Гер. Механіка, Вип. 3, т. 1 2000, с. 130–137.
7. Хубларян М. Г. Водные потоки: модели течений и количества суши. – М.: Наука, 1991. – С. 191.

Поступила в редколлегию 28.05.03.