

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ГИДРОХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ ОБЬ ПРИ АВАРИЙНОМ СБРОСЕ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

О.Р. Набиева,

*Новосибирский Государственный Архитектурно-Строительный Университет (Сибстрин),
630008, г.Новосибирск, ул.Ленинградская 113, кафедра ГТСиГ,
ONabieva@gmail.com*

С помощью уравнений плановых течений проведен расчет поля скоростей, а также моделирование распространения загрязняющих веществ от водовыпусков городских сооружений канализации в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла в штатном и аварийном режиме.

Город Новосибирск расположен в долине Оби ниже плотины Новосибирской ГЭС. Самотечные рассеивающие выпуски городских очистных сооружений находятся на левом берегу реки. Река на данном участке является судоходной, с интенсивными процессами русловой деформации. Русловые процессы обуславливают динамическое воздействие на конструктивные элементы выпускной системы, затрудняя их нормальное функционирование.

При проведении водолазных работ в 2003 г. было отмечено, что самотечные линии трубопроводов в русловой их части местами замыты и находятся в грунте, а частично оголены, и под трубой наблюдается размыв грунта на глубину до 2,7 м на участках длиной от 10 до 50 м.

Оголенные и провисшие участки труб испытывают повышенные динамические нагрузки от течения реки, что может послужить причиной их полного или частичного разрушения. При образовании трещин либо поломке отдельных частей, стоковые воды изливаются непосредственно в реку в месте разрыва, что приводит к потере рабочей рассеивающей способности водовыпусков и чревато негативными экологическими последствиями.

Возникает задача оценки последствий залпового поступления загрязненных вод высокой концентрации для окружающей среды и населения. Для расчета поля скоростей и переноса загрязняющих веществ в водотоке используется двумерная численная модель, позволяющая с нужной степенью детальности воспроизвести плановую структуру течения вблизи водовыпусков. Численное экспериментирование позволяет изучить основные закономерности динамики концентрации загрязняющих веществ в реке в штатном режиме и при аварийной ситуации и на основе сопоставительного анализа сделать выводы о возможных экологических рисках, получить количественные оценки загрязнения природных сред.

Постановка задачи расчета кинематических характеристик течения

В горизонтальной плоскости введем декартову систему координат с осями x, y , так, чтобы средняя ориентация русла совпадала с направлением оси y . Поверхность руслового ложа зададим уравнением $z = d(x, y)$, где функция, описывающая рельеф. Исходные уравнения рассматриваются в области, конфигурация которой может меняться со временем – например, в результате повышения или сброса уровня воды.

Уравнения плановых течений запишем в виде [Стокер, 1959; Кочин, 1963]

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial (h+d)}{\partial x} + t_x - \frac{l_h}{2} |\vec{u}| u, \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} &= -gh \frac{\partial (h+d)}{\partial y} + t_y - \frac{l_h}{2} |\vec{u}| v, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где g - ускорение силы тяжести, t_x, t_y - напряжения ветра; l_u – безразмерный коэффициент гидравлического трения; $|\vec{u}| = \sqrt{u^2 + v^2}$ - модуль скорости течения. При использовании формулы Маннинга запишем $l_h = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}$, где n - коэффициент донного сопротивления.

Сформулируем краевые условия. На входном створе $y = y_1$ (створ 1) будем считать известным суммарный речной расход q_1 как функцию времени и положение уровня свободной поверхности $V_1 = (h + d)|_{y=y_1}$. Поперечное распределение расхода, формировалось в предположении равновесного значения скоростей. Эти значения рассчитывались из уравнения импульса (1), в котором пренебрегалось инерционными слагаемыми, так что потери напора, обусловленные силами сопротивления, балансировались средним уклоном, что в предположении отсутствия касательного компонента скорости на границе приводит к соотношению

$$0 = -ghi_y - \frac{l_h}{2} v^2, \quad (2)$$

где i_y - уклон свободной поверхности. Отсюда, с учетом формулы Маннинга, находится поперечный профиль скорости

$$v^2 = -\frac{h^{4/3} i_y}{n^2}, \quad (3)$$

Неизвестное значение уклона i_y определяется из соотношения

$$\int_1 v h dx = q_1, \quad (4)$$

где интегрирование проводится вдоль поперечника входного створа 1.

Соотношения (3) - (4) определяют граничные условия на входном створе. В поперечнике выходного створа $y = y_2$ (створ 2) используемое краевое условие формулируется исходя из наличия натурных данных. При известной динамике расходов $q_2(t)$ можно использовать условие, подобное (4)

$$\int_2 v h dx = q_2, \quad (5)$$

Постановку задачи замыкают начальные условия на компоненты скорости u, v и пространственное распределение глубин h в момент $t = 0$. Начальные поля формировались как решение стационарных уравнений (1), полученное методом установления при согласованных правых частях краевых условий.

Сформулированная задача решалась методом конечных разностей по пространству и времени. Интегрирование по времени проводилось методом расщепления с использованием неявных алгоритмов. Уравнения движения расщеплялись по физическим процессам так, чтобы минимизировать влияние быстрых гравитационных волн со скоростями распространения $c = \sqrt{gh}$. Это позволило смягчить критерий Куранта в виде ограничения на временной шаг $\Delta t < \Delta x / c$ и провести расчеты с $\Delta t = 60$ с. Задача решалась методом установления, физическое время расчета на ПК класса Пентиум 4 составляет несколько часов.

Модель переноса загрязняющих веществ

Уравнения переноса взвешенных фракций в речной воде формулируются в рамках плановой модели, описывающей динамику двумерного потока. Вектор горизонтальной скорости $\mathbf{u} = (u, v)$ здесь считается известной функцией переменных x, y и времени t . Обозначим c – концентрация примеси. В случае сброса веществ сложного фракционного состава

рассматриваются c_i – частные концентрации отдельных фракций ($i = 1, \dots, N$). При этом считается $c = \sum_{i=1}^N c_i$. Мультидисперсность состава загрязняющих веществ проявляется, в частности, в разной скорости осаждения разных фракций примеси. Задача моделирования распространения облака многокомпонентной примеси в двумерной постановке сводится к расчету уравнения для i -ой фракции

$$\frac{\partial h c_i}{\partial t} + \frac{\partial h u c_i}{\partial x} + \frac{\partial h v c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} h E_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h E_y \frac{\partial c_i}{\partial y} - w_i c_i + R_i + A \cdot c \quad (6)$$

где R_i – интенсивность сброса i -го компонента, w_i – гидравлическая крупность, A – матрица, описывающая химическое взаимодействие компонентов, E_x, E_y – коэффициенты дисперсии.

При решении задачи в русле краевые условия для поля c формулируются следующим образом. На входном створе распределение концентрации считается известным и равным некоторым фоновым значениям

$$c_i = \bar{c}_i(s) \quad (7)$$

где s – координата вдоль поперечника входного створа. На выходе задаются условия

$$\frac{\partial c_i}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

где n – направление нормали к поперечнику.

Расчет рассеяния, обусловленного вертикальным сдвигом скорости и диффузией, проводился в рамках модели [Brown, Barnwell, 1987], обобщенной на плановое течение согласно формулам

$$E_x = 0.35 B n \frac{|u|}{\sqrt{u^2 + v^2}} h^{\frac{5}{6}} \quad E_y = 0.35 B n \frac{|v|}{\sqrt{u^2 + v^2}} h^{\frac{5}{6}} \quad (9)$$

где n – коэффициент сопротивления Маннинга, B – безразмерная константа дисперсии. Значение B изменяется в весьма широких пределах (от 8.6 до 7500 по Брауну); основываясь на результатах работы [Семчуков, Квон, 1999], положим $B=250$. Остальные параметры модели (9) выбираются из результатов расчета уравнений плановой модели.

Исходные данные и параметры модели

Схематизация формы поперечного сечения русла осуществлялась согласно рис.1.

Выбор расположения базисных створов определялся морфометрией русла так, чтобы поперечники располагались в местах наибольшего расширения и сужения берегов и экстремальных глубин потока. Первый и последний створ задают границы расчетной области.

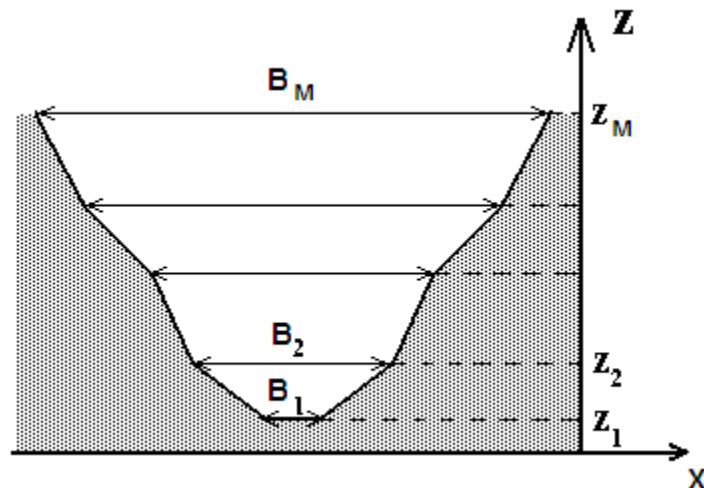


Рисунок1 - Схематизация формы русла

Для формирования морфометрических характеристик области построены профили поперечного сечения русла для 39 базисных створов. При этом использовались результаты натурных съемок, проведенных экспедицией МГУ в 2003-2004 гг.[5]. Профили глубин на поперечниках послужили основой для создания цифровой модели рельефа $Z_{ij} = d(x_i, y_j)$ на регулярной сетке, пригодной для использования в плановой численной модели.

Базовая область интегрирования представляет собой прямоугольник в плане со сторонами около 15 км по оси x и 32 км по y и включает русло реки длиной свыше 40 км (по судовому ходу), ориентированное в среднем по оси y (на север). Начальный створ 1 соответствует координате $y_1 = 0$ и расположен в районе Димитровского моста г. Новосибирска. Равномерная конечно-разностная сетка содержит 634×650 (около 400 тыс.) узлов и устанавливает пространственное разрешение $\Delta x = 25$ м, $\Delta y = 50$ м. Меньший шаг в поперечном к оси русла направлении задан в связи с необходимостью детализации местоположения труб водовыпуска, длина которых в русловой части составляет около 200 м.

Для расчета положения уровня на входном створе использовалась информация, представленная в отчете ВНИИГ им. Веденеева [6], позволяющая аппроксимировать кривую связи уровней и расходов на створе в районе водопоста "Новосибирск" в виде формулы

$$h_1 = a\sqrt{q_1} + b, \quad (10)$$

где a, b – эмпирические константы.

Результаты расчетов

Основные численные эксперименты проведены при установившемся режиме течения с вариантами расходов воды $q_1 = q_2 = 1000, 1500, 2000$ м³/с, характерными для летнего периода. Задача решалась в два этапа. Вначале, путем интегрирования уравнений (1), рассчитывались поля u, v, h , отвечающие заданному расходу q_1 . На втором этапе решалась нестационарная задача переноса субстанции (в данной работе приведены результаты по моделированию примеси в виде красителя) с рассчитанными полями скорости. Модель допускает независимое решение уравнений второго этапа на собственной сеточной области. Это позволяет по мере необходимости увеличивать разрешающую способность модели переноса примеси. Необходимость сгущения сеточных узлов возникает при моделировании рассеяния вблизи источника, где возможно формирование полей концентрации со значительной пространственной неоднородностью. При переходе на вспомогательную сетку поля скоростей пересчитывались по формулам линейной интерполяции.

Интерполированные значения u, v не являются балансными, т.е. удовлетворяют уравнению неразрывности в (1) с некоторой ошибкой, обусловленной переходом на новую сетку. С целью получения сбалансированного вектора расходов проводилась процедура фильтрации ошибок на основе метода наименьших квадратов в сочетании с методом множителей Лагранжа. Полученные соленоидальные поля u, v служили в качестве базовых при решении задачи переноса загрязнителя.

Цель расчетов состояла в изучении динамики распространения шлейфа загрязнителей при различных значениях расходов воды и двух режимах выпуска сточных вод. В штатном режиме водовыпуск был представлен в виде линейного источника с равномерно распределенной по длине трубы интенсивностью сброса (рисунок 2). Характерное время установления распространения примеси при расходе в реке $Q = 1500$ м³/с составляет 4800 с. Выпуск сточных вод осуществляется на расстоянии 200 м от начала координат. Максимальная концентрация примеси в штатном режиме принята за единицу. На рисунке 2 можно увидеть плавное изменение концентрации по длине реки.

В аварийном режиме весь объем сброшенных вод был сосредоточен в одной элементарной ячейке (3×3 м²) сеточной области, которая располагалась на 100-метровом расстоянии от берега (рисунок 3). Можно увидеть, что концентрации субстанции при распределении от точечного источника в 8 раз превышают концентрации в штатном режиме. На расстоянии порядка 500 метров наблюдается пик содержания загрязняющего вещества и далее следует

резкий спад. То есть, наиболее незащищенной частью экосистемы реки является участок, расположенный в непосредственной близости от очистных сооружений канализации.

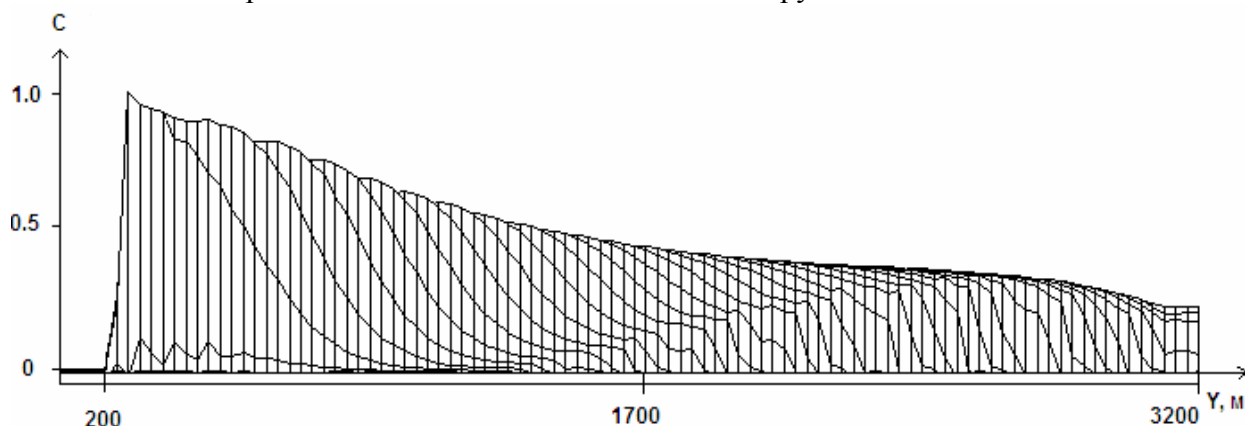


Рисунок 2- Распределение примеси от линейного источника, $t=4800$ с (штатный режим)

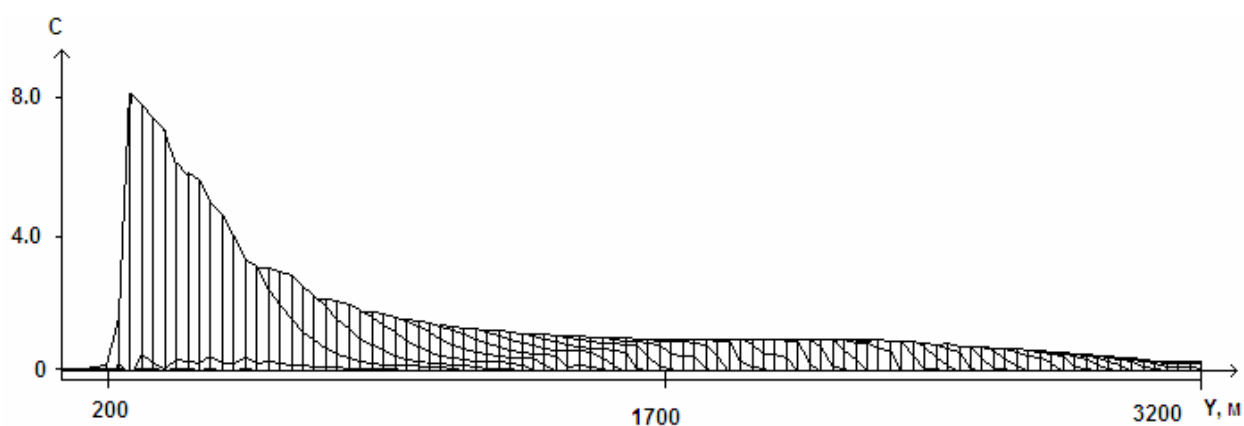


Рисунок 3 – Распределение примеси от точечного источника, $t=4800$ с (аварийный режим)

Объемы сброса задавались из "Характеристик источников загрязнения поверхностных вод за 2002 год" [7]. Суточный расход сточных вод, проходящих биологическую очистку на очистных сооружениях канализации составлял величину порядка 820 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ ($9,49 \text{ м}^3/\text{с}$).

Река Обь на рассматриваемом участке является водным объектом рыбохозяйственного назначения и потому к качеству воды предъявляются весьма строгие требования. Любая аварийная ситуация нарушает равновесие речной экосистемы и обуславливает порой непредсказуемые изменения. Планируется провести расчет в меженный период (при открытом русле), когда расходы в реке составляют $800\text{-}1000 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет наибольшую опасность для загрязнения реки.

Выводы

Представленная модель расчета течений и распространения примесей с учетом механизмов ее трансформации позволяет рассчитывать пространственную динамику полей концентрации в русле р. Обь при нормальном и аварийном режимах функционирования городских очистных сооружений.

Результаты расчетов могут быть использованы для оперативной оценки состояния и качества воды и принятия управленческих решений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-05-98012.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Стокер Дж. Дж. Волны на воде. Изд-во иностр. лит., 1959, 617 с.
- 2 Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М., Физматгиз, 1963, Ч.1., 584 с.
- 3 Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я. Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках. Водные ресурсы, т.33, №1, 2006, с.29-38.
- 4 Семчуков А. Н., Квон В. И. Определение интенсивности сброса загрязняющих веществ в реку по данным наблюдений в расположенном ниже створе. Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 84-91.
- 5 Отчет по научно-исследовательской теме «Выполнить комплексные исследования гидрологического и руслового режима р. Оби (Новосибирская ГЭС – с. Дубровино), оценить современное состояние и разработать прогноз деформаций русла и посадки русла». – М.: МГУ, 2005. – 206 с.
- 6 Технический отчет "Исследование трансформации русла р. Оби и прогноз понижения уровней воды в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла до 2050 г.". – С.-П.: ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 2006. – 222 с.
- 7 Ежегодник качества поверхностных вод и эффективности проведения водоохранных мероприятий по территории деятельности Зап-Сиб УГМС за 2002. Ч I, II. – Новосибирск: Зап-Сиб УГМС, 2003. – 116 с.
- 8 Brown L.C., Barnwell T.O. The enhanced stream water quality mod-els QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. Athens: EPA, 1987, 189 p.

APPLICATION OF NUMERICAL MODEL FOR CALCULATION OF HYDRO-CHEMICAL POLLUTION OF THE RIVER OB AT THE EMERGENCY DUMPING OF URBAN SEWAGE

O.R. Nabieva

On the basis of the equations scheduled currents calculation of a field of speeds in the river Ob is carried out. Distribution of polluting substances from water-releases of city constructions of the water drain in an afterbay of Novosibirsk hydroelectric power station was modelled.