УДК 532.5:536.2

О ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ[1]

М. В. Зарецкая[2]

TO THE PROBLEM OF MODELING DANGEROUS HYDROLOGICAL PHENOMENA

Zaretskaya M. V.

The work describes methods for developing a large-scale model of riverbeds and a solution to the hydrodynamics problems on the movement of a water current in riverbeds, which are approximately modeled by cylindrical, conical and other simple water flows.

В работе рассмотрена задача моделирования процессов и оценки последствий опасных гидрологических явлений, таких как паводки и наводнения, включающего в себя построение крупномасштабной модели русел рек и решение задач гидродинамики о движении водного потока в руслах, моделируемых цилиндрическими, конусообразными и другими водоводами.

1. Наводнения известны как самые массовые стихийные бедствия. Поскольку паводки определяют критерии риска наступления наводнений, их изучению посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований в области гидрометеорологии.

Рассматриваются три группы паводков [1]:

- паводки, вызванные метеорологическими факторами, такими как ливневые осадки в бассейнах рек, быстрое таяние снега и льда на склонах водосбора. Это паводки дождевого, снегового и смешанного снегодождевого происхождения;
- паводки, вызванные или усиленные русловыми условиями либо другими местными факторами: заторами во время весеннего или осеннего ледохода, подпорами от мостов, гидротехническими сооружениями или завалами в руслах рек, прорывами плотин и береговых дамб;
- селевые паводки, вызванные совместными действиями метеорологических факторов и геоморфологических особенностей рельефа водосбора и русла рек: накопления наносов на склонах и в руслах рек, их размыв или смыв.

Хозяйственная деятельность человека зачастую многократно усиливает пики паводков, вызываемых метеорологическими или иными факторами. Последнее обстоятельство заставляет выделить в рамках изложенной выше классификации, две категории паводков:

- антропогенные паводки, вызванные преднамеренным либо случайным разрушением гидротехнических сооружений (плотин, дамб, оросительных систем и др.);
- естественно-антропогенные паводки, возникающие вследствие поступления ливневых или талых вод, которые в сочетании с нарушением режима эксплуатации, отсутствием либо недостаточностью выполенения регламентных и профилактических работ на этих сооружениях вызывают частичное либо полное разрушения гидротехнических систем.

В таких случаях последствия паводка и наводнения бывают наиболее тяжелыми. Это

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ (03-01-96519, 03-01-96587, 03-05-96630), Министерства образования и науки РФ (Е02-4.0-190), гранта Президента РФ (НШ-2107.2003.1)

[2]Зарецкая Марина Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ проблем механики и геоэкологии КубГУ.

обусловлено, с одной стороны, внезапностью явления, а с другой — последовательным, цепным разрушением гидротехнических и ирригационных сооружений вниз по течению, и приводит к катастрофическим масштабам наводнения. Подобное наблюдалось в 2002 г. на реке Кубань в Краснодарском крае.

По данным Агентства по мониторингу и прогнозированию ЧС (ВНИИ ГОЧС) опасные гидрологические явления, в первую очередь наводнения, являются основной составляющей суммарного экономического ущерба для подавляющего большинства регионов и субъектов Российской Федерации. В 2002 г. на территории Северного Кавказа произошли 4 катастрофические чрезвычайные ситуации, обусловленные стихийными гидрологическими явлениями. По предварительной оценке величина суммарного ущерба, нанесенного экономике Северного Кавказа во время воздействия трех из них (экономический ущерб по сходу ледника еще не оценен), составила около 21,5 млрд. рублей.

Наводнение на Северном Кавказе от летних дождевых паводков в июне 2002 г. нанесло ущерб свыше 16,5 млрд. рублей и привело к гибели более 100 человек.

Одним из основных факторов, способствовавших повышению риска опасных явлений и чрезвычайных ситуаций в 2002 г., явилось свертывание в последние десятилетия мероприятий, направленных на предупреждение и предотвращение опасных явлений (русловыпрямительные, дноуглубительные работы, работы по укреплению берегов, строительство селезащитных сооружений, дамб, обваловок, отводных и обводных каналов). Возможным решением проблемы может быть развитие математических методов оценки последствий опасных гидрологических явлений.

Создание математических моделей водных потоков в руслах рек, проходящих в условиях рельефной местности, выход их в период паводков за пределы традиционных берегов, перенос потоком воды масс грунта, песка и других материалов, оседающих в фарватере русел и устьях, является сложной математической задачей.

Для построения крупномасштабной модели русел рек предлагается аппроксимировать в первом приближении геометрию русел рек и водоемов простейшими, но правильно описывающими пропускную способность и перепады высот, водоводами — частично заполненными каналами: цилиндрами, конусами, сфероидами, входы и выходы которых являются границами сопряжения краевых задач сообщающегося водовода, состоящего из вышеперечисленных звеньев.

Количество таких звеньев может быть большим, что существенно затрудняет решение задачи. В связи с этим выделяется блок звеньев, называемый мелкомасштабным, для которого строится модель с входом и выходом, допустимая для расчетов в рамках имеющихся вычислительных средств. Изученный блок рассматривается как «черный ящик», определяемый входной и выходной функциями, который сопрягается с другими блоками. Функционирование «черных ящиков» описывается передаточной функцией — аппроксимацией сложного набора компонент цепи одного блока.

Для каждого звена проблема сводится к моделированию процессов смыва, переноса и оседания наносов, вовлеченных в движение перемещениями водных масс в акваториях различного типа. Предполагается, что источники загрязнения являются точечными, линейными и площадными и моделируют выпадение осадков, отбор воды на водохозяйственные нужды, сбор через водоочистительные сооружения, а также смыв загрязняющих веществ различных типов. Исследование предполагается проводить для всплывающих, взвешенных и тяжелых оседающих загрязняющих веществ.

2. Математическую модель процесса транспорта наносов в русловом потоке можно подразделить на гидродинамическую подмодель и подмодель переноса. Гидродинамическая подмодель позволяет получить распределение поля скоростей в русловом потоке, которое будет использоваться в уравнениях переноса на втором этапе решения задачи. Для пассивной примеси, когда наносы не влияют на течение смеси в целом, задачи решаются независимо.

Наиболее общей моделью течения в режиме сплошной среды является система уравнений Навье-Стокса [2, 3]. Для них формулируется краевая задача.

В декартовой системе координат полная система уравнений движения неоднородной вязкой несжимаемой жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x_1} + v\frac{\partial u}{\partial x_2} + w\frac{\partial u}{\partial x_3} = F_1 - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_1} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_3^2}\right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x_1} + v\frac{\partial v}{\partial x_2} + w\frac{\partial v}{\partial x_3} = F_2 - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_2} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x_3^2}\right),$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x_1} + v\frac{\partial w}{\partial x_2} + w\frac{\partial w}{\partial x_3} = F_3 - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_3} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_3^2}\right), \quad (1)$$

где $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}$ — известные массовые силы; ρ — плотность; p — давление; $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ — скорости потока; $\nu = \mu/\rho$ — кинематический коэффициент вязкости; μ — динамический коэффициент вязкости; $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$ — координаты точки в декартовой системе координат.

Для определения скоростей потока жидкости в каналах используется модель ламинарного тепломассопереноса [4]. Это модель медленного течения при малых изменениях плотности (приближение Буссинеска), малых числах Рейнольдса Re и малых числах Маха M (для газа), когда имеет место разрешимость краевой задачи и нет потери устойчивости, $Re = Ul/\nu, Re = 10 \operatorname{div} 10^3$ (U — характерная скорость, l — характерный размер).

Граничные условия включают условие прилипания на неподвижных твердых поверхностях, а также кинематическое и динамическое условия на свободной поверхности:

$$\mathbf{V} = 0. \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x_1} + v\frac{\partial s}{\partial x_2} + w\frac{\partial s}{\partial x_3} = 0.$$

$$p = p_a, \quad (3)$$

где $s(\mathbf{x}, t) = 0$ — уравнение свободной поверхности; p_a — атмосферное давление.

В данной постановке задачи, учитывая масштабность моделируемых процессов, можно пренебречь поверхностными напряжениями, вызванными, например, действием ветра, поверхностным натяжением жидкости и кривизной поверхности.

Система уравнений (1) и граничные условия (2) и (3) составляют полную систему уравнений для гидродинамической подмодели.

Перенос пассивной неконсервативной примеси в движущейся водной среде с учетом процессов диффузии и распада описывается уравнением

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{V}\varphi) + \sigma_0\varphi = \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_i \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right) + f(\mathbf{x}, t). \quad (4)$$

Здесь φ — концентрация примеси; $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ — вектор скоростей переноса примеси (определяется на первом этапе в результате решения уравнений Навье-Стокса); $\mathbf{K} = \{K_1, K_2, K_3\}$ — коэффициенты диффузии; σ_0 — коэффициент поглощения, характеризующий взаимодействие примеси с водой или воздухом; $f(\mathbf{x}, t)$ — функция источника. Коэффициенты диффузии и скорости зависят от координат.

Граничные условия выписываются в зависимости от типов наносов, особенностей дна и формулируются как граничные условия смешанного типа, изменяющиеся при движении вдоль границы. Это приводит к исследованию краевых задач как псевдодифференциальных операторов эллиптического типа в пространстве медленно растущих обобщенных функций с последующим сведением операторных уравнений к системам линейных интегральных уравнений первого рода.

3. Для получения решения гидродинамической подмодели (1)–(3) используются программные комплексы, реализующие ряд численных методов, в том числе, метод конечных объемов с возможностью локального измельчения и адаптации прямоугольной сетки, а также средства визуализации течений методами компьютерной графики.

Проведены расчеты для элементов, позволяющих аппроксимировать русло реки любой сложности (цилиндрический, конический канал; каналы, моделирующие поворот русла и резкое заглубление и др.)

На рис. 1 представлен конический канал, на рис. 2 — канал, моделирующий резкое сужение русла. Для каждого из них произведен расчет поля скоростей на выходе из канала. Результаты расчетов можно отобразить в

Рис. 1. Участок русла, моделируемый коническим каналом

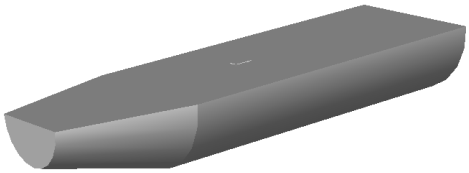

Рис. 2. Канал, моделирующий русло с сужением

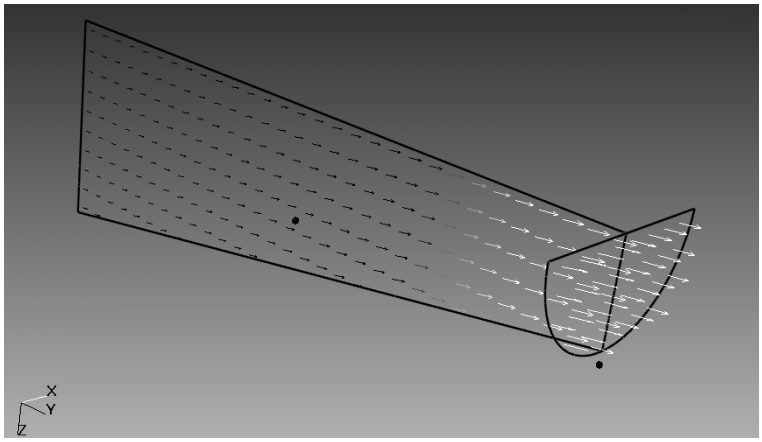

Рис. 3. Векторы скорости в канале

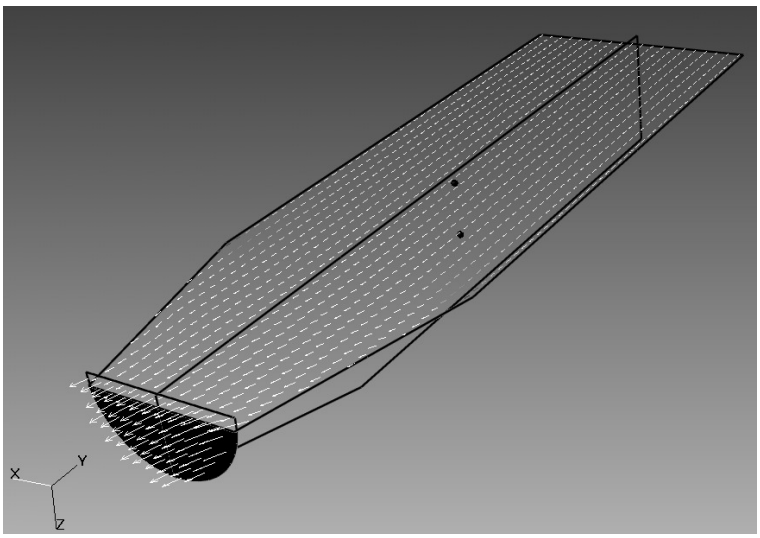

Рис. 4. Векторы скорости в канале с сужением

графической форме, что позволяет визуально контролировать процесс, или записать компоненты вектора скорости в файл, который будет использоваться для последующего решения задачи переноса. На рис. 3, 4 показано распредение скоростей на выходе из каналов.

Литература

1. *Малинецкий Г.Г., Гусев А.В.,Семенченко Б.А.* Паводки, их причины и необходимость прогнозирования // Безопасность энергетических сооружений: Сб. науч. тр. 2003. Вып. 11.
2. *Шашин В.М.* Гидромеханика. М.: Высшая школа, 1990. 384 с.
3. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1983. 528 с.
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

Статья поступила 16 ноября 2004 г.
Кубанский государственный университет
© Зарецкая М. В., 2004