

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕТРАНЗИТНЫХ ЧАСТЕЙ ВОДОТОКОВ СЛОЖНЫХ СЕЧЕНИЙ

Одномерные математические модели используются не только как средство обоснования эффективных инженерных решений при проектировании водохозяйственных объектов, но и как инструмент, с помощью которого можно находить эффективное оперативное управление водными ресурсами в существующих системах. Расширение области их применения позволит выполнить расчеты движения воды в сложных водотоках и системах водотоков с выходом потока на пойму. Сечение водотока при этом становится сложным с неоднородной по периметру шероховатостью и существенно различной глубиной в русле и на частях поймы. Анализ аэрофотоснимков и непосредственные измерения показали, что при определенных уровнях воды течение осуществляется на отдельных, обычно вытянутых вдоль водотока, пониженных частях поймы с относительно небольшими коэффициентами шероховатости. В таких случаях значительная часть сечения является нетранзитной, так как скорость течения в ней практически равна нулю. Поэтому нет основания для учета ее в площади живого сечения, так как следствием было бы неверное определение следующих гидравлических характеристик: площади живого сечения, смоченного периметра, гидравлического радиуса и модуля расхода. Указанные особенности движения воды на поймах неоднократно отмечались многими исследователями [1, 2]. Белгипроводхозом (аэрофотосъемка) и ЦНИИКИВРом выполнено экспериментально исследование движения воды на широкой пойме р. Припяти (табл. 1). Нетранзитные части сечения при определенных уровнях воды достигали $2/3$ ширины водного сечения. Аналогичное положение возникает и при эксплуатации водохозяйственных систем, особенно в аварийных ситуациях.

Естественно было бы использовать в таких случаях двухмерные математические модели [3, 4], но при расчете водотоков большой протяженности процесс вычислений усложняется, так как требует большого количества детальной исходной морфометрической и гидравлической информации, которая обычно отсутствует. Вместе с тем при обосновании многих инженерных решений необходимо и достаточно решение задачи в одномерной постановке. Однако как предположения о том, что все водное сечение поймы является живым сечением, так и исключение из него всей площади потока над поймой [15], приводит к результатам, существенно отличающимся от наблюдаемых [5]. Поэтому необходим более детальный учет возникновения нетранзитных зон на поймах.

Воспользуемся следующими физическими предпосылками. Неустановившееся движение воды на пойме является медленно изменяющимся и характеризуется плавными подъемами и спадами уровней. Это значит, что локальные и конвективные составляющие сил инерции малы по сравнению с силами сопротивления. Поэтому силы тяжести и силы сопротивления и определяют в основном движение воды. В соответствии с гипотезой квазистационарности при

Наблюденные и расчетные размеры транзитных частей сечения

Способ получения исходных данных	Максимальная глубина, м	Полная ширина B_0 , км	Транзитная ширина B_1 , км	
			экспериментальная	расчетная
Аэрофотосъемка	5,7	24,7	7,5	10,6
То же	5,0	29,4	10,2	10,7
Измерения на пойме	5,0	14,1	3,5	3,0

неравномерном и неустановившемся течении в спокойных потоках силы сопротивления движению определяются по зависимостям для равномерного течения. Лишь при высокой степени нестационарности [6], недостижимой при неустановившемся движении в открытых водотоках, гидравлические сопротивления отличаются от таковых при равномерном течении. Исследования полей продольных скоростей при неустановившемся течении [7, 8, 9] подтверждают предположение о том, что в спокойных потоках при неустановившемся и неравномерном течении при невысокой степени нестационарности и неоднородности по длине поля продольных скоростей, как и гидравлические сопротивления, незначительно отличаются от полей скоростей при равномерном течении. Это позволяет предложить методику выделения нетранзитных частей сечения, основанную на сравнении местных поверхностных скоростей над каждым элементом периметра водотока со средней в сечении скоростью. Естественно считать нетранзитными части сечения над теми элементами периметра, для которых местная осредненная поверхностная скорость мала по сравнению со средней в сечении, т.е. выделение нетранзитных частей периметра выполнять по критерию

$$r_i \geq u_{\text{пов}} / v, \quad (1)$$

где $u_{\text{пов}}$ — поверхностная скорость над элементом (или его частью) периметра сложного сечения, м/с; v — средняя в сечении скорость, м/с.

Для определения поверхностной скорости над каждым элементом периметра можно воспользоваться полуэмпирической формулой расчета поля продольных скоростей в сечениях сложной формы с неоднородной по периметру шероховатостью [10]:

$$u = v + Lv_y(x) \left(1 + \frac{\sqrt{q}}{\kappa C_y(x)} \left(1 + \ln \frac{D_B(x, y)}{H(x)} \right) \right) + \\ + Mv_x(y) \left(1 + \frac{\sqrt{q}}{\kappa C_x(y)} \left(1 + \ln \frac{D_\Gamma(x, y)}{B(y)} \right) \right) - S,$$

где $D_B(x, y)$, $D_\Gamma(x, y)$ — расстояние от ближайшей границы до точки в сечении

по вертикали и горизонтали, м; $B(y), H(x)$ – расстояние от границы соответственно до ближайшей гидродинамической оси и поверхности, м; $C_y(x), C_x(y)$ – коэффициенты Шези; $v_y(x), v_x(y)$ – средние скорости плоских потоков по вертикали и горизонтали, м/с; κ – постоянная Кармана; g – ускорение силы тяжести, м²/с; L, M, S – параметры, учитывающие влияние на поле продольных скоростей границ сечения [10].

По статистической оценке [11] погрешности вычисления продольных скоростей с помощью (2) практически во всем сечении, кроме окрестностей границ, не превышали 2%, а с надежностью 0,95 – 3%.

Структура формулы (2) такова, что местная осредненная скорость прямо пропорциональна корню квадратному из уклона. Следовательно, в (1) уклоны в числителе и знаменателе сокращаются и параметр r_i не зависит от них. Размеры нетранзитных частей зависят только от формы сечения и распределения по периметру шероховатости. Они изменяются с глубиной наполнения и могут быть определены до выполнения расчетов неустановившегося движения воды на стадии создания математической модели водного объекта.

Структуру эмпирической зависимости для r_i можно получить на основе следующих соображений. Чем больше отношение ширины к глубине потока и неоднородность распределения скоростей в сечении, тем большая вероятность того, что над каким-то элементом периметра возникнет нетранзитная часть сечения. Отношение ширины к глубине и неоднородность распределения по сечению скоростей желательно характеризовать безразмерными отношениями, соответственно B/H и u_{\max}/v , где B и H – ширина и глубина потока, м;

u_{\max} – максимальная поверхностная скорость, м/с.

Функция $r_i = f\left(\frac{B}{H}, \frac{u_{\max}}{v}\right)$ должна быть плавно изменяющейся в

широких диапазонах изменения аргументов. Этим требованиям удовлетворяет зависимость

$$r_i = \frac{u_{\max}}{v} \operatorname{th}\left(c \frac{B}{H}\right), \quad (3)$$

где c – параметр, определяемый по экспериментальным данным. Например, для поймы р. Припяти $c = 6,5 \cdot 10^{-5}$. Результаты выделения нетранзитных частей сечений при указанном значении c представлены в табл. 1. Расчетная ширина транзитного потока отличается от экспериментальной. Однако, учитывая сложность задачи и ограниченность технических возможностей выделения нетранзитных частей сечения как по материалам аэрофотосъемки, так и по данным непосредственных измерений полей скоростей в потоках, ширина которых достигает нескольких десятков километров, можно считать, что вычисленная ширина транзитного потока удовлетворительно согласуется с наблюдаемой.

С целью придания большей универсальности описанной методике алгоритм выделения нетранзитных частей усовершенствован. Для минимального k -го уровня вычисляется приведенный коэффициент шероховатости n_k [12]. Для каждого последующего уровня воды добавляются новые элементы

периметра со своими локальными значениями коэффициента шероховатости между k -м и $(k+1)$ -м уровнями и вычисляется приведенный коэффициент шероховатости n_{k+1} . Выделение нетранзитных частей в сечении начинается при значении параметра $c = 6,5 \cdot 10^{-5}$. Если на $(k+1)$ -м уровне приведенное значение коэффициента шероховатости увеличивается (уменьшается) вместе с увеличением (уменьшением) оставшихся локальных значений коэффициентов шероховатости на участках периметра между k -м и $(k+1)$ -м характерными уровнями, то константа выбрана правильно. Если предыдущие условия не выполняются, то параметр c подобран неточно, он автоматически уменьшается (увеличивается) на 5 % и расчеты повторяются до одновременного увеличения (уменьшения) локальных и приведенных значений коэффициентов шероховатости.

На границе транзитных и нетранзитных частей существуют значительные градиенты скоростей, интенсивные пульсационные движения, приводящие к большим касательным напряжениям, а при их схематизации — к большим коэффициентам шероховатости. Численное значение коэффициента шероховатости на границе транзитных и нетранзитных зон (0,04) принято на основании экспериментальных данных [13].

В работе [13] экспериментально изучалось течение воды в круглой трубе с тонкими диафрагмами одинакового диаметра. Диафрагмы были установлены на таком расстоянии, чтобы поток, проходя через одну из них и расширяясь, лишь коснувшись боковой стенки, сужался перед входом в следующую диафрагму. Таким образом, поток, проходя через систему диафрагм, на всем протяжении взаимодействовал с нетранзитными частями сечения и через них — с жесткими границами. В экспериментах детально измерялось распределение по длине давления, что позволило определить величину гидравлических сопротивлений и вычислить среднее значение коэффициента шероховатости, которое оказалось близким к 0,04. Эта величина и принята в качестве приближенного значения коэффициента шероховатости на границах транзитных и нетранзитных частей сечений водотока. Если для элемента периметра выполнялось условие (1), то с его концов проводились вертикальные линии до пересечения с поверхностью и на них как на границах нетранзитных частей назначался коэффициент шероховатости $n = 0,04$. Часть сечения между упомянутыми вертикальными линиями принималась нетранзитной, и эта часть исключалась из общей ширины. Аналогично поступали и с выделением нетранзитной части площади. Таким образом, транзитная часть принимала измененные очертания по сравнению с полным сечением.

После выделения нетранзитных частей для оставшегося сечения определялись площадь, смоченный периметр и модуль расхода, вычислялось приведенное значение коэффициента шероховатости [12], которые затем и использовались при создании одномерных математических моделей водных объектов сложных сечений. Для реализации предложенного алгоритма написана программа с автоматическим выделением нетранзитных частей сечения, с помощью которой создаются математические модели водных объектов. Результаты расчета водного режима, выполненные при ее применении, были удовлетворительными [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Л.И., Русинов М.И. Особенности в схематизации пойменных русел при расчетах неустановившегося движения воды // Тр. ГГИ. — 1967. — Вып. 140. — С. 83–90. 2. Федосеев В.А. Одномерная схематизация неустановившегося движения при изоляции русла и поймы // Тр. ГГИ. — 1969. — Вып. 173. — С. 3–33. 3. Шугрин С.М. Соединение одномерной и двухмерной (плановой) моделей течения воды // Водные ресурсы. — 1987. — № 5. — С. 5–15. 4. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики открытых потоков. — М., 1978. — 240 с. 5. Никифоровская В.С. О численных моделях неустановившихся течений в руслах с поймами // Динамические задачи механики сплошных сред. — Новосибирск, 1978. — Вып. 35. — С. 89–98. 6. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. — М., 1982. — 240 с. 7. Шабрин А.М. Швидкісна структура відкритих потоків при несталеному русі // Доповіді АН УРСР. — 1963. — № 11. — С. 1448–1451. 8. Шабрин А.Н. Исследование скоростей структуры неустановившегося открытого потока: Автореф. ... канд. техн. наук. — Киев, 1964. — 17 с. 9. Богданович М.И. Анализ влияния неравномерности и нестационарности движения на распределение продольных осредненных скоростей // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1985. — Вып. 14. — С. 81–85. 10. Рогунович В.П., Богданович М.И. Распределение продольных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. — Мн., 1984. — Вып. 13. — С. 56–62. 11. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных потоках неправильной формы поперечного сечения // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. — М., 1984. — Т. 1. — С. 21–23. 12. Рогунович В.П. Определение приведенного коэффициента шероховатости // Метеорология и гидрология. — 1986. — № 3. — С. 81–88. 13. Бампи С.А. Определение коэффициента шероховатости на границе транзитного потока и водоворотной зоны в круглой трубе с диафрагмами // Изучение и использование водных ресурсов. — М., 1980. — С. 105–110. 14. Рогунович В.П., Вап Ю.И., Бампи С.А., Шнипов Ф.Д. Математическая модель системы водотоков бассейна р. Припять в естественном состоянии и при обваловании // Проблемы Полесья. — 1982. — № 8. — С. 75–92. 15. Abbott M.B., Verhoeg F.A. Data reversible sustems for flood routing // 13 th Congr. Internat. Assoc. Hydraul. Res. Kyoto, 1969. — Vol. 1. — P. 305–312.

УДК 532.543

Ф.Д. ШНИПОВ

К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

Изучению трехмерного движения воды в прямолинейных руслах некруглой формы уделяется большое внимание. Исследования проводятся в двух тесно взаимосвязанных направлениях: теоретическом, посвященном созданию математических моделей, и экспериментальном, направленном на углубленное изучение механизма турбулентных течений в каналах ограниченных размеров и получение данных для обоснования разрабатываемых математических моделей. Однако все достигнутое относится в основном к простейшим видам течений, в частности трубам прямоугольной формы [1].

Важным аспектом турбулентного движения воды в руслах некруглой формы являются поперечные течения, существование которых доказано теорети-