

$$\int_{\omega} u_z d\omega = \int_0^B \int_{z_0}^{z_1} u_z(y, z) dz dy = \sqrt{I} \int_0^B c_z(y) h(y) \sqrt{h(y)} dy, \quad (2)$$

где $c_z(y)$ – скоростной множитель Шези, определяемый для вертикали $h(y)$ плоского потока, находящейся на расстоянии y от начала отсчета; z_0 и z_1 – отметка дна водотока и поверхности воды.

Периметр поперечного сечения русла сложной формы можно представить состоящим из линейных отрезков, а сечение – из трапецидальных, прямоугольных и треугольных отсеков. Тогда вычисление интегралов системы (2) можно свести к суммированию расходов, проходящих через эти отсеки. Расходы через отсеки будут определяться зависимостью, используемой для определения скоростного множителя Шези c .

Вычисление расходов для плоских потоков по горизонтали выполняется с учетом положения ГО.

По предлагаемой методике вычислены средние значения коэффициентов шероховатости. Погрешность расчетов приведенного коэффициента шероховатости по предлагаемой методике составила (в процентах) 1 ± 1 при доверительной вероятности $P = 0,95$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. – Л., 1978. – 152 с. 2. Рогуневич В.П., Богданович М.И. Распределение скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хоз-во и гидротехн. стр-во. – Минск, 1984. – Вып. 14. – С. 56–62. 3. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных открытых потоках неправильной формы поперечных сечений // Тезисы докл. Второй Всес. конференции. – Т. 11. – М., 1984. – С. 21–24.

УДК 532.543

С.А.БАМПИ (ЦНИИКИВР)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОСИ В СЕЧЕНИЯХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Пропускная способность русел сложных сечений с неоднородной шероховатостью на отдельных участках смоченного периметра зависит от среднего значения коэффициента шероховатости данного сечения. Известные способы его определения, в частности, средневзвешенный по периметру, не позволяют достаточно надежно определить пропускную способность русел из-за многообразия форм поперечных сечений и вариантов расположения различной шероховатости по периметру, которая создает существенно различные сопротивления движению воды. Последние приводят к тому, что в сечении возникают нетранзитные зоны по причине наличия больших местных сопротивлений движению, например, на закустаренных и залесенных участках периметра. Причем при небольших глубинах эти участки могут быть нетранзитными, а при больших – транзитными, одни и те же участки сечения при различных

глубинах включаются или исключаются из общей площади сечения, вследствие чего изменяется форма, площадь сечения и пропускная способность. Учет этих факторов невозможен с помощью существующих методов определения пропускной способности, кроме методики, предложенной в работах [1, 6], которая позволяет определить среднее значение коэффициента шероховатости из решения системы уравнений

$$\begin{cases} C_h \sqrt{hI} = \frac{Q_B}{\omega}; \\ C_B \sqrt{BI} = \frac{Q_r}{\omega}; \\ \frac{1}{h} + \frac{1}{B} = \frac{1}{R}. \end{cases} \quad (1)$$

При выполнении расчетов для открытого потока применительно к сечению неправильной формы обычно рассматриваются исходное и гипотетическое сечение прямоугольной формы с одинаковой по периметру шероховатостью [1], а также в соответственных сечениях следующие плоские потоки: параллельный вертикальной плоскости и параллельный — горизонтальной (слева и справа от гидродинамической оси, за которую принимается линия $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$).

В уравнениях слева содержатся характеристики прямоугольного сечения, справа — характеристики сечения неправильной формы. В системе (1) h — глубина прямоугольного сечения; B — полуширина прямоугольного сечения; C_h и Q_B — скоростной множитель Шези и суммарный расход плоского потока в вертикальных плоскостях (по вертикали), параллельных направлению течения; C_B , Q_r — скоростной множитель Шези и суммарный расход плоского потока в горизонтальных плоскостях (по горизонтали), параллельных направлению течения; ω — площадь сечения. Для решения системы (1) создана и отлажена программа [1], позволяющая решить эту сложную систему.

Суммарный расход плоского потока по горизонтали состоит из суммы расходов плоских потоков в сечении слева и справа от гидродинамической оси, поэтому точность определения Q_r зависит от точности определения положения гидродинамической оси в потоке. Ранее за гидродинамическую ось сечения принималась линия, для которой $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$, где v — осредненная местная продольная скорость, проходящая через середину ширины сечения на различных отметках [2, 3], т.е. соблюдалось равенство площадей слева и справа относительно гидродинамической оси. В первом приближении такое решение приемлемо, особенно если коэффициенты шероховатости на локальных участках периметра справа и слева от оси близки по значению друг другу. Однако, если шероховатость меняется резко (это часто случается при выходе потока на пойму), местоположение гидродинамической оси должно сместиться в сторону меньшей шероховатости, т.е. необходимо соблюдать равенство расходов.

В настоящее время определить положение гидродинамической оси можно лишь приближенно.

Для установления координат гидродинамической оси можно воспользоваться формулой распределения скоростей в плоском потоке Прандтля—Кармана в связи с тем, что в нее входит коэффициент шероховатости.

Скорости плоского по горизонтали потока для левой и правой частей относительно гидродинамической оси соответственно равны:

$$v_{\text{л}} = u_{\text{л}} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_{\text{л}}} \left(1 + \ln \frac{y_{\text{л}}}{B_{\text{к}}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$v_{\text{п}} = u_{\text{п}} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_{\text{п}}} \left(1 + \ln \frac{y_{\text{п}}}{B_{\text{п}}} \right) \right],$$

где $u_{\text{л}}$, $u_{\text{п}}$ — средние на вертикали скорости плоского по горизонтали потока, определяемые по формулам

$$u_{\text{л}} = C_{\text{л}} \sqrt{B_{\text{л}} I}, \quad (3)$$

$$u_{\text{п}} = C_{\text{п}} \sqrt{B_{\text{п}} I},$$

где $B_{\text{л}}$, $B_{\text{п}}$ — расстояния от левого и правого берега до гидродинамической оси; $y_{\text{л}}$, $y_{\text{п}}$ — расстояния от левого и правого берега до точки, в которой вычисляется скорость; κ — постоянная Кармана, примерно равная 0,4; g — ускорение силы тяжести.

В точке гидродинамической оси

$$v_{\text{л}} = v_{\text{п}}; y_{\text{л}} = B_{\text{л}}; y_{\text{п}} = B_{\text{п}}.$$

Тогда

$$\sqrt{B_{\text{л}}} \left(c_{\text{л}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \right) = \sqrt{B_{\text{п}}} \left(c_{\text{п}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \right) \quad (4)$$

или

$$\sqrt{B_{\text{л}}} (c_{\text{л}} + 7,83) = \sqrt{B_{\text{п}}} (c_{\text{п}} + 7,83), \quad (5)$$

где $c_{\text{л}}$ и $c_{\text{п}}$ — коэффициенты Шези для $B_{\text{л}}$ и $B_{\text{п}}$.

Для определения скоростного коэффициента Шези воспользуемся формулой Агроскина. В случае больших коэффициентов шероховатости, выходящих за пределы значений, рекомендуемых Агроскиным, и малых гидравлических радиусов формулы для определения c приводят к погрешностям. В таких случаях можно применить формулу Срибного. Таким образом, если $B \geq 1$, то коэффициент вычисляется по формуле Агроскина:

$$c = \frac{1}{n} + 7,7 \ln B, \quad (6)$$

если $B < 1$, c вычисляется по формуле Срибного:

$$c = \frac{1}{n} B^{1,18} \sqrt{n}, \quad (7)$$

где n — локальный коэффициент шероховатости.

Подставляя (6) и (7) в (5), методом итерации определим положение гидродинамической оси с учетом всех локальных коэффициентов шероховатости.

В сложном сечении гидродинамическая ось определяется отдельно для каждого характерного уровня (в данном сечении) и состоит из нескольких частей, сливающихся на некотором уровне в одну кривую (рис. 1).

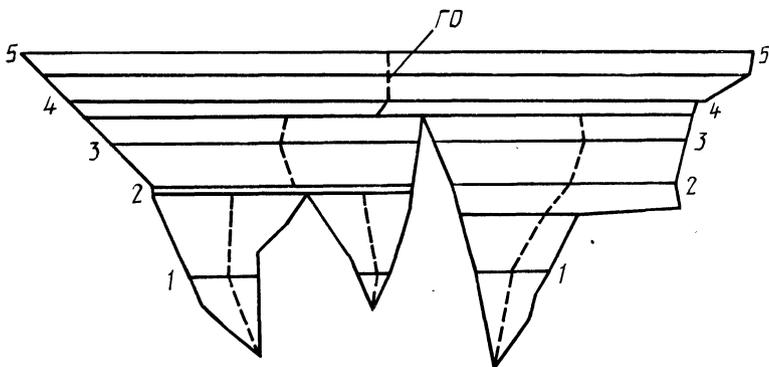


Рис. 1. Схема расположения гидродинамической оси в сложном сечении:
1, 2, 3, 4, 5 — характерные уровни сечения

Составлена и отлажена программа на ФОРТРАН 4, которая в любом сложном сечении по координатам сечения и локальным коэффициентам шероховатости позволяет определить средний коэффициент шероховатости и координаты гидродинамической оси для нескольких характерных (от пяти до десяти) уровней.

Уточненное положение гидродинамической оси позволяет рассчитать площадь сечения справа и слева относительно нее, а также модули расхода плоского по горизонтали потока справа или слева, что является необходимым условием для определения среднего коэффициента шероховатости в сечениях для характерных уровней, модуля расхода при данном наполнении сечения [1], а также поля продольных осредненных скоростей в руслах как правильной, так и неправильной форм [2, 4]. В работе [5] по 75 полям скоростей, измеренным в потоках различной формы сечения, определена погрешность вычисления продольных скоростей по методике [4] с учетом расположения гидродинамической оси (не превышает 2 %, а с надежностью 0,95 — 3 %).

Погрешности вычисления минимальны для водотоков с плавным изменением формы сечения и локальных коэффициентов шероховатости.

Предложенная методика позволяет определять положение гидродинамической оси в руслах сложной формы сечения с неоднородной по периметру шероховатостью с достаточной степенью точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогуневич 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. — Вып. 8. — 1982. — С. 75—92. 2. Коваленко Э.П. Исследование движения воды в открытых руслах. — Минск, 1963. — 223 с. 3. Бампи С.А. Распределение скоростей в плоском равномерном потоке // Вопросы водного хозяйства Белоруссии. — 1965. — С. 129—136. 4. Рогуневич В.П., Богданович М.И. Распределение продольных скоростей в руслах неправильной формы сечения // Водное хозяйство и гидротехн. стр-во. Минск. — 1983. — Вып. 13. — С. 63—71. 5. Богданович М.И. Метод расчета продольного компонента осредненной скорости в равномерных открытых потоках неправильной формы поперечного сечения // Динамика и термика рек, водохранилищ и эстуариев. Тезисы докл. 2-й Всес. конференции. М., 1984. — Т. 1. — С. 21—24. 6. V.P.Rogunovich /U.S.S.R/: Mathematical Models of Water Motion in Channel Systems (I.C.N.M.C.O.F.W.R.E.A.). Bratislava, 1981.

УДК 532.543:62/41

В.П.РОГУНЕВИЧ, Ф.Д.ШНИПОВ,
канд-ты техн. наук (ЦНИИКИВР)

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЕЛ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Устойчивость русел земляных каналов в основном определяется величиной динамического воздействия на частицы подстилающего грунта движущегося турбулентного потока. Установлено [3], что в продольно-однородных потоках турбулентные характеристики и динамические усилия распределены по периметру неравномерно. Это объясняется трехмерностью поля осредненных скоростей: в каналах некруглой формы существуют небольшие (1—5 % от средней скорости) поперечные компоненты, образующие совместно с продольным стационарные течения с винтообразными линиями тока [1, 2]. Поперечные течения оказывают значительное влияние на распределение по сечению продольных скоростей и касательных напряжений, транспорт насосов, процессы перемешивания, аэрации, тепло- и массообмена. Существующие методы гидравлического расчета земляных каналов не учитывают влияние поперечного осредненного движения, а, следовательно, реально существующего распределения по периметру придонных характеристик. Это приводит к тому, что сечения, запроектированные по методам допускаемой средней скорости или влекущей силы, подвергаются деформациям, расширяются и мелеют; уменьшается надежность работы каналов, снижается их пропускная способность.

В статье представлены теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие влияние поперечных течений на устойчивость русел земляных каналов трапецеидальной формы сечения.

Поперечные компоненты осредненной скорости, создавая поле конвективных токов, зависящее от формы, размеров канала и распределения по сечению турбулентных напряжений, осуществляют концентрированный перенос импульса из зон с большими его значениями к размываемым границам потока, что приводит к перераспределению по периметру придонных скоростей и касательных напряжений на стенке. Измерения последних, выполненные