ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО БЕЛОРУССИИ
МИНСК 1972

И. С. Кувыкин

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЖИВОГО СЕЧЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ НА ВЕЛИЧИНУ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ РУСЛА

Известная в гидравлике показательная зависимость, которой предложил пользоваться проф. Б. А. Бахметев [1] при расчете плавно изменяющегося движения жидкости в открытых призматических руслах с постоянным уклоном дна, имеет вид:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\chi, \tag{1}$$

где χ — гидравлический показатель русла; h_1, h_2 — глубины потока, соответствующие расходам Q_1 и Q_2 (или модулям расхода K_1 и K_2) в русле при равномерных режимах.

Несмотря на кажущийся простой вид этой формулы, она не находит широкого применения в практике гидравлических расчетов в силу сложности определения гидравлического показателя χ. Теоретический анализ зависимости (1) и сопоставление данных экспериментальных исследований показали, что гидравлический показатель χ зависит не только от формы, размеров и шероховатости русел [2, 3, 4], но и от характера распределения скоростей в потоке.

Чтобы установить связь между гидравлическим показателем русла χ и характером распределения осредненных скоростей в потоке, воспользуемся дифференциальным уравнением распределения скоростей, полученным применительно к плоскому установившемуся потоку [5]:

$$\frac{du}{u} = x\frac{dy}{y}, \tag{2}$$

где u — местная осредненная скорость в точке потока, расположенной по нормали на расстоянии y от дна русла; x — параметр, вытекающий из закона распределения скоростей в пределах одного пограничного слоя.

Параметр x имеет функциональную связь с коэффициентом Шези, постоянной Прандтля—Кармана и коэффициентом Кориолиса α [5, 6, 7]. Последняя осуществляется с помощью аналитической формулы, проверенной экспериментальными исследованиями:

$$x = \frac{\ln\alpha}{2\ln\dfrac{y_c}{y_v}} = \frac{\ln\alpha}{2\ln\dfrac{\delta}{\beta}}, \tag{3}$$

где y_c — расстояние от дна до центра тяжести живого сечения, где жидкость движется со скоростью u_c; y_v — расстояние до точки, движущейся со средней скоростью потока v; δ, β — коэффициенты, вытекающие из отношения этих расстояний к глубине (высоте) пограничного слоя.

При известных значениях α, δ, β формула (3) позволяет параметр x, относящийся к любой конфигурации сечения потока, условно привести к модели плоского потока.

Величину δ для каждой формы сечения русел можно определить аналитически, а величины α и β — экспериментальным путем.

Для открытых естественных и искусственных широких русел коэффициент $\alpha=1{,}1-1{,}2$, а $\beta=0{,}36-0{,}40$ [2, 4, 7]. В исследованных автором железобетонных лотках параболической и полуциркульной формы, а также в трапецеидальных каналах с облицованными бетоном откосами (оросительные системы Ростовской области) коэффициент α составлял 1,05—1,18, а коэффициент β — 0,2—0,3. На моделях лотков с гладкими стенками, исследованными в лабораторных условиях [8], коэффициент α в зависимости от различных форм сечения был равен 1,05—1,12, а β от 0,17—0,27.

Чтобы установить степень влияния формы живого сечения и образующегося в нем поля осредненных скоростей на величину гидравлического показателя русла χ при плавно изменяющемся движении жидкости в открытых руслах, воспользуемся формулой средней скорости, предложенной ранее автором [7, 8] для расчета шероховатых русел:

$$v=\frac{1}{\sqrt{\alpha}}u_c=\frac{1}{n}R^{x+0,5}\sqrt{i}, \tag{4}$$

где n — коэффициент шероховатости; R — гидравлический радиус; i — гидравлический уклон.

Опытные наблюдения автора за движением жидкости в каналах и лотках различной формы сечения, а также данные исследований других авторов [1, 2, 4] показали, что при постоянном уклоне в руслах с геометрически правильной формой сечения (широком прямоугольном, трапецеидальном, параболическом, треугольном), глубина наполнения пропорциональна гидравлическому радиусу, т. е.

$$h=\sigma R, \tag{5}$$

показатель степени x практически не изменяет своего значения при переходе от h_1 к h_2. В этом случае коэффициенты α, δ, β практически остаются неизменными. Отсюда следует, что отношение средних скоростей в различных сечениях потока в соответствии с формулами (4) и (5) можно записать так:

$$\frac{v_1}{v_2}=\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{x+0,5}\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{x+0,5}. \tag{6}$$

В зависимостях (5), (6) коэффициент σ близок к постоянному значению и численно его можно определить по следующим формулам:
в трапецеидальном русле:

$$\sigma=\frac{\psi+2\sqrt{1+\mathrm{ctg}^2\varphi}}{\psi+\mathrm{ctg}\,\varphi}, \tag{7}$$

где $\psi=\frac{b}{h}$; b— ширина русла по дну; h — глубина; φ — угол наклона откоса к горизонту;
в треугольном русле:

$$\sigma=\frac{2\sqrt{1+\mathrm{ctg}^2\varphi}}{\mathrm{ctg}\,\varphi}; \tag{8}$$

в прямоугольном широком русле:

$$\sigma = 1 + \frac{2}{\psi}. \tag{9}$$

В русле треугольного профиля $\sigma = \text{const}$. Наибольшее отклонение коэффициента σ от постоянного значения наблюдается для русел прямоугольного сечения, но и для них здесь, даже при изменении h_1 по сравнению с h_2 в 1,5 раза, отклонения σ_1 от σ_2 составляют 10%.

Если пренебречь этими отклонениями и принять $\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{x+0,5} \approx 1$, то формула (6) примет вид

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{x+0,5}. \tag{10}$$

Квадратичное отношение расходов

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+1}, \tag{11}$$

где ω_1, ω_2 — площади живых сечений, которые в руслах геометрически правильной формы в большинстве своем изменяются пропорционально глубине их наполнения. Если учесть это свойство, то из общей формулы (11) можно получить следующие формулы для русел различных форм и соответствующие им гидравлические показатели русла χ:
для русел широкого прямоугольного профиля, где $\omega = bh$:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+3}, \quad \chi = 2x + 3; \tag{12}$$

для русел треугольного профиля с одинаковыми углами наклона откосов к горизонту, где $\omega = \text{ctg}\varphi h^2$:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+5}, \quad \chi = 2x + 5; \tag{13}$$

для русел трапецеидального профиля, где $\omega = (b + ctg\varphi h)h$:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{b + \text{ctg}\,\varphi\, h_1}{b + \text{ctg}\,\varphi\, h_2}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+3} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+3}, \tag{14}$$

где B_1 и B_2 — размеры ширины русла по верху, профиль которого можно представить в виде трапеции с одной вертикальной боковой стороной, $B = b + \text{ctg}\varphi h$.

После несложных математических преобразований показательную зависимость (1) для трапецеидального русла можно представить так:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left[1 - \frac{\text{ctg}\,\varphi\,(h_2 - h_1)}{b + \text{ctg}\,\varphi\, h_2}\right]^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+3} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\chi}, \tag{15}$$

откуда

$$\chi = 2x + 3 + \frac{2 \ln\left[1 - \frac{\text{ctg}\,\varphi\,(h_2 - h_1)}{b + \text{ctg}\,\varphi\, h_2}\right]}{\ln h_1 - \ln h_2}. \tag{16}$$

Для русел параболического профиля, где $\omega = \frac{2}{3} Bh$; B — ширина русла по верху, формула (11) будет иметь вид:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+3}. \tag{17}$$

Если B_1 и B_2 выразить через каноническое уравнение $Y=2pX^2$, то получим равенство

$$\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 = \frac{h_1}{h_2}, \tag{18}$$

после чего формула (17) запишется так:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{2x+4}, \quad \chi = 2x + 4. \tag{19}$$

Предлагаемые расчетные зависимости для определения гидравлического показателя русла в зависимости Б. А. Бахметева хорошо согласуются с числовыми значениями Н. Н. Павловского [2] и ряда других авторов.

Литература

1. *Б. А. Бахметев.* О неравномерном движении жидкости в открытом русле. М., 1932. 2. *Н. Н. Павловский.* Гидравлический справочник. М., 1937. 3. *B. Bjarsch.* Die Verfahren der Berechnyng stationär unhleic hformiger Strömungen in offenen Gerinnen regelmäßigen Querschnitts. Wasserwirschaft—Wassertechnik, 1966, № 2. 4. *Р. Р. Чугаев.* Гидравлика. М., 1963. 5. *И. С. Кувыкин.* Исследование влияния скоростной структуры турбулентного потока на пропускную способность круглых напорных и безнапорных труб. Тр. Южн. науч.-исслед. ин-та гидротехники и мелиорации, вып. 12, 1967. 6. *И. С. Кувыкин.* Значение постоянной Прандтля — Кармана в свете новых показательных зависимостей. Сб. «Вопросы гидротехники и мелиорации». Новочеркасск, 1967. 7. *И. С. Кувыкин.* Нов метод за определяне коэфициента на Кориолис в зависимост от профила на хидравличното русло и скоростната структура на течението. «Хидротехника и мелиорации», 1969, № 3. 8. *И. С. Кувыкин.* Исследование гидравлических сопротивлений в открытых водоводах различной формы сечения. Сб. науч. тр. БСХА, т. 59, 1969.