УДК 551.482.212.001.572(282.247.31)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ КРИТЕРИЕВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УЧАСТКА Р. ДНЕСТР С ВОДОЗАБОРОМ

Дмитриев С. В., Слободянюк В. П. *(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)*

Решение задачи выбора главных и второстепенных критериев моделирования руслового процесса в условиях ограниченных размеров русловой площадки и необходимости соблюдения гидравлического подобия модели и натуры при моделировании участка р. Днестр с водозабором.

Установившееся движение в естественных открытых руслах обычно наблюдается в виде плавно изменяющегося безотрывного движения жидкости при условии отсутствия сильных водоворотных зон. В этом случае определяющую роль играют силы трения, но если русло криволинейное, в котором проявляется поперечная циркуляция, этой составляющей скоростей пренебречь нельзя. В большинстве практических задач, с которыми приходится встречаться при моделировании рек и каналов движение воды происходит по вышеописанной схеме. Иными словами, определяющими критериями здесь являются критерии Фруда и Рейнольдса [1,2].

Так как течение в открытых руслах возникает под действием силы тяжести, основным критерием моделирования будет число Фруда:

$$F_r = \frac{V^2}{(g * h)} = idem\,, \qquad (1)$$

Где: V – скорость течения в натуре и на модели;
h – глубины потока в натуре и на модели.

В потоке действуют также силы вязкости (трения) и, чтобы учесть их влияние необходимо обеспечить подобие и по числу Рейнольдса. При гидравлических исследованиях гидротехнических сооружений практически невозможно удовлетворить одновременно двум критериям подобия – Фруда и Рейнольдса. Поэтому важно установить какой критерий будет в данных условиях основным или доменирующим, а какой менее важным, второстепенным [1, 2, 3].

В качестве основного критерия подобия принимаем закон Фруда, так как при достаточно высоких числах R_e силы сопротивления турбулентному течению определяются только сопротивлением формы элементов шероховатости, тогда как вязким сопротивлением или поверхностным трением, можно пренебречь. Эта область чисел Рейнольдса называется квадратичной зоной сопротивления или областью гидравлически шероховатых русел. В ней реализуется режим с полным проявлением шероховатости. Коэффициент сопротивления в этом случае не зависит от числа Рейнольдса и сохраняет постоянное значение для каждой относительной шероховатости (см., например, график И. Никурадзе) [3]. Для моделирования сопротивления формы в квадратичной зоне достаточно, чтобы течение в модели было также турбулентным и соответствовало области гидравлически шероховатых русел, а сопротивление формы воспроизводилось в надлежащем масштабе. Критерием установления квадратичной зоны сопротивления, а также, и области автомодельности по числу Рейнольдса можно считать по Дж. Шарпу [2] выполнение соотношения: $R_e > R_{e\,гр}$;

где граничное значение числа Рейнольдса определяют из зависимости

$$R_{e\,гр} = \frac{V * R}{\nu} > 1000 \text{ (критерий Рассела)}, \qquad (2)$$

Принимая за характерный размер гидравлический радиус, равный при достаточно широком русле примерно средней глубине потока $R = h_{ср}$, приравнивая характерную скорость средней скорости течения ($V = V_{ср}$), осредняя кинематическую вязкость воды до значений:

$$\nu = 1 * 10^{-6}\ м^2/с\ [2]. \qquad (3)$$

Как показывают теоретические и практические исследования [1, 2, 3] обеспечить подобие по критерию Фруда и автомодельность по Рейнольдсу ($R_e > R_{e\ гр}$) на гидравлических моделях относительно небольшого масштаба весьма сложно, так как при этом коренным образом меняется не только режим течения, но и тип гидравлического сопротивления. В натуре преобладает сопротивление формы, в модели же значительную роль начинает играть сопротивление вязкого трения. Кроме того, возникают трудности чисто измерительного характера (измерение скоростей, уклонов и пр.), а также трудности с моделированием шероховатости и т. д.

Наиболее распространенным способом преодоления всех этих трудностей является применение моделей с различными масштабами для вертикальных и горизонтальных размеров, принмая вертикальный (масштаб глубин) $\frac{1}{\alpha_h}$ крупнее планового $\frac{1}{\alpha_l}$ (т.е. $\alpha_l > \alpha_h$).

Задача о выборе допустимого искажения геометрических масштабов модели не имеет однозначного решения и в определенной степени зависит от цели моделирования и особенностей моделируемого объекта, в частности, пространственного течения, по данным некоторых исследователей допустимая величина искажения в масштабе $e = \frac{\alpha_l}{\alpha_h}$ не должна превышать е = 5…10 [3]. По американским данным малые искажения ($e \leq 6$) допустимы для моделей, воспроизводящих распределение скорости в разветвляющихся каналах или участках, удаленных от мест изгиба русел или резкого изменения их поперечного сечения. По Г. В. Васильченко [4] наибольший допустимый коэффициент искажения масштабов не должен превышать значения, вычисленного по зависимости:

$$e \leq \frac{0{,}1 * B_H}{h_H}, \tag{4}$$

где, $B_н$ и $h_н$ – ширина и глубина естественного русла.

Такой подход был применен к выбору коэффициента искажения масштабов для исследования участка р. Днестр с водозабором Карагашской ОС. По плану участка р. Днестр в районе исследуемого водозабора (рис. 1) в изобатах коэффициент искажения может лежать в пределах $e \leq 3{,}5 - 7{,}5$.

Горизонтальный масштаб гидравлической модели участка реки Днестр в районе водозабора определился размерами русовой площадки лаборатории кафедры гидротехнических сооружений и был принят равным $\alpha_l = 150$, что позволило промоделировать участок реки длиной порядка 1100 м., вполне достаточной для получения достоверных результатов. Учитывая относительно небольшие глубины реки в районе водозабора вертикальный масштаб был принят равным $\alpha_h = 50$, что обеспечивает с приведенными выше рекомендациями допустимую степень искажения масштаба е = 3.

Масштабы параметров течения в моделях с искаженной геометрией отличаются от тех, которые используются в неискаженных моделях. В частности, масштаб скорости должен выражаться через масштаб глубины и удовлетворять условию подобия по числу Фруда:

$$\frac{V^2}{g*h} = \text{const} \qquad (5)$$

откуда следует: $$\alpha_V = \frac{V_н}{V_м} = \left(\frac{h_н}{h_м}\right)^{\frac{1}{2}} = (\alpha_h)^{\frac{1}{2}} = (50)^{\frac{1}{2}} = 7{,}07 \qquad (6)$$

Так как средняя скорость в натуре, подсчитанная как между сечениями 1-1 и 2-2 естественного русла (рис. 1), равна приближенно 1,7 м/с при пропуске расхода Q=860 $м^3$/с, соответствующего отметке 1,61 м, при которой производились замеры глубин, то средняя скорость на модели будет:

$$V_м = \frac{V_н}{\alpha_V} = \frac{1{,}7}{7{,}07} = 0{,}24 \text{ м/с} \qquad (7)$$

Средняя глубина потока на участке между сечениями 1-1 и 2-2 естественного русла равна $h_н$=2,6 м. Средняя глубина на модели составит:

$$h_м = \frac{h_н}{\alpha_h} = \frac{2{,}6}{50} = 0{,}052 \text{ м.} \qquad (8)$$

Масштаб уклона русла будет равен:

$$\alpha_i = \frac{I_н}{I_м} = \frac{\left(\frac{h_н}{L_н}\right)}{\left(\frac{h_м}{L_м}\right)} = \frac{h_н * L_м}{h_м * L_н} = \frac{\alpha_h}{\alpha_l} = \frac{50}{150} = \frac{1}{3}, \text{ или}$$

$$I_м = \frac{I_н}{\alpha_i} = \frac{I_н * 3}{1} = 3 * I_н, \text{ т.е. } I_м = e * I_н. \qquad (9)$$

Как и следовало ожидать, при искажении масштабов уклон на модели должен быть больше, чем в натуре. При этом необходимо, чтобы на модели сохранялось спокойное течение ($I_м < I_{кр}$), иначе качественно изменится характер течения.

Масштаб шероховатости также изменяется. Его можно определить, используя закон сопротивления Маннинга [2].

$$\frac{V_н}{V_м} = \frac{n_м}{n_н} * \left(\frac{R_н}{R_м}\right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{i_н}{i_м}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (10)$$

$$\alpha_V = \frac{1}{\alpha_n} * \alpha_R^{\frac{2}{3}} * \alpha_i^{\frac{1}{2}}. \qquad (11)$$

Принимая $\alpha_h = \alpha_R$, что вполне допустимо для достаточно широких русел (B > 6*h), получим:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_R^{\frac{2}{3}} * \alpha_h^{\frac{1}{2}}}{\alpha_h^{\frac{1}{2}} * \alpha_l^{\frac{1}{2}}} = \frac{\alpha_h^{\frac{2}{3}}}{\alpha_l^{\frac{1}{2}}} = \frac{50^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{150}} = 1{,}11\,, \; n_м = \frac{h_н}{\alpha_n} = \frac{h_н}{1{,}11}. \qquad (12)$$

Принимая для естественных русел шириной более 300 м величину $n_н = 0{,}025$ [5] шероховатость модели должна составить:

$$n_м = \frac{0{,}025}{1{,}11} = 0{,}023. \qquad (13)$$

Определим число Рейнольдса для модели:

$$R_{e_М} = \frac{V_М * h_М}{\nu} = \frac{0{,}24 * 0{,}052}{1 * 10^{-6}} = 12480 > R_{e_{гр}}. \qquad (14)$$

Таким образом, в модели обеспечено удовлетворение критерию квадратичной зоны сопротивления. Кроме того, согласно данным А. Г. Аверкиева [1], при этих числах Рейнольдса наступает автомодельность и при моделировании водоворотов, что дает возможность определять размеры водоворотных зон.

При искажении масштабов изменились, также, некоторые масштабные коэффициенты, которые приводятся с целью облегчения пересчета результатов модельных исследований на натуру:

$$\alpha_\omega = \frac{\omega_н}{\omega_м} = \alpha_l * \alpha_h\,; \; \omega_н = \omega_м * \alpha_l * \alpha_h\,; \qquad (15)$$

$$\alpha_V = \frac{V_н}{V_м} = \sqrt{\alpha_h}\,; \; V_н = V_м * \sqrt{\alpha_h}\,; \qquad (16)$$

$$\alpha_Q = \frac{Q_Н}{Q_М} = \alpha_l * \alpha_h^{\frac{3}{2}}\,; \; Q_Н = Q_М * \alpha_l * \alpha_h^{\frac{3}{2}}\,; \qquad (17)$$

$$\alpha_i = \frac{I_н}{I_м} = \frac{\alpha_h}{\alpha_l}; \quad I_н = I_м * \frac{\alpha_h}{\alpha_l}. \tag{18}$$

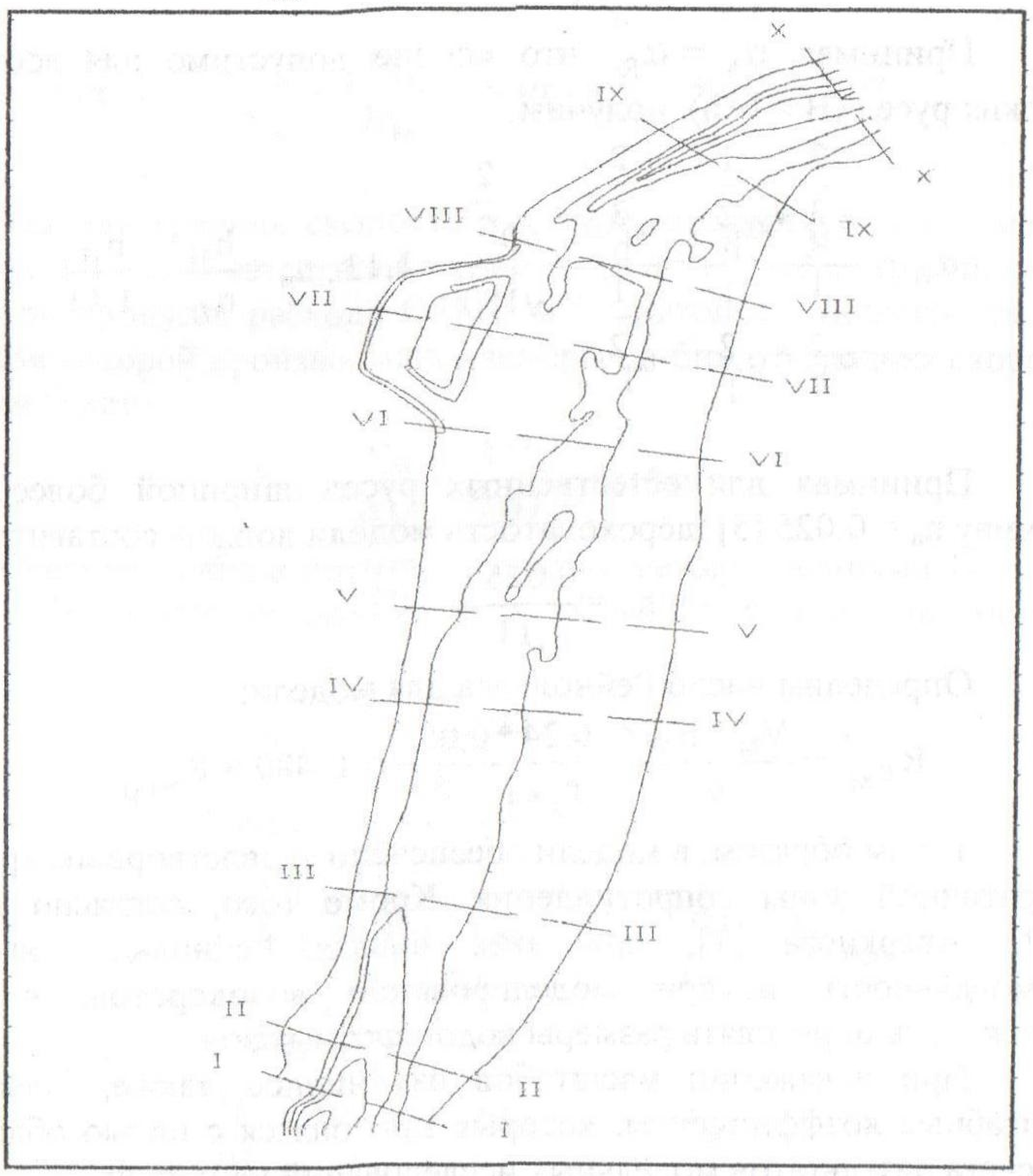

Рис. 1: План исследуемого участка р. Днестр со створами для построения модели.

Литература

1. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960г.

2. Шарп. Дж. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984г..

3. Гидротехнические сооружения. Под. Ред. Н.П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1985г.

4. Васильченко Г. В. Воздействие потоков на мелиоративные и водохозяйственные сооружения. –Минск:Ураджай, 1985г.

5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. –Л.: Энергия, 1975г.