

*Н.Б. Барышников, Е.В. Польцина, Т.С. Селина, Е.С. Субботина*

## **МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ**

*N.B. Baryshnikov, E.V. Poltsina, T.S. Selina, E.S. Subbotina*

## **THE METHODS OF CALCULATION OF CAPACITY OF FLOODPLAIN RIVERBEDS**

*Анализом методов расчёта пропускной способности пойменных русел установлено, что наиболее перспективной, хотя и недостаточно разработанной, является методика, основанная на системе уравнений движения потока с переменной по длине массой. На основе экспериментальных данных установлена зависимость инерционных членов этого уравнения от глубины потока и угла между динамическими расходящимися осями взаимодействующих потоков. Их наибольшие значения составляют соответственно 80,1 и 24,2 %, т.е. являются вполне значимыми.*

*By the analysis of the methods of calculation of capacity of floodplain riverbeds it was established that the most promising, but not developed enough, methods are those that are based on the system of equations of motion of stream with the mass varying with the length. On the basis of the experimental data the dependence of the terms of this system of equation was determined to depend on the depth of the stream and the angle between the dynamical and moving apart axes of the interacting streams. Their maximal values are 80.1 and 24.2 % respectively, i.e. they are meaningful enough.*

Существенные изменения циклонической деятельности, обусловленные, по-видимому, происходящими изменениями климата, в конце прошлого – начале текущего веков вызвали катастрофические паводки редкой обеспеченности на многих европейских реках, а также на ряде рек ЕТР. К сожалению, на большинстве из них измерения максимальных расходов воды не производились, в частности, из-за необходимости выполнения требований техники безопасности. Всё это с учётом резкого снижения качества натуральных данных на сети Росгидромета приводит к необходимости совершенствования методов расчёта пропускной способности пойменных русел.

К сожалению, движение воды в таких руслах является неравномерным, неустановившемся и более того с переменным по длине расходом воды, поэтому применение уравнения равномерного движения, основанного на формуле Шези (1), приводит к большим погрешностям расчётов [Барышников, 1978; Скородумов, 1965 и др.].

Рассмотрим методы расчётов пропускной способности пойменных русел. Ведомственные наставления [Наставление..., 1972], в частности, рекомендуют указанную выше методику, основанную на формуле Шези в виде:

$$Q = Q_p + Q_n = F_p v_p + F_n v_n = F_p C_p \sqrt{h_p I_p} + F_n C_n \sqrt{h_n I_n}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения;  $v$  – средняя скорость;  $C$  – коэффициент Шези;  $h$  – средняя глубина;  $I$  – уклон водной поверхности;  $p$  и  $n$  – индексы, свидетельствующие о том, что параметры относятся к русловой ( $p$ ) и ( $n$ ) пойменной частям потока.

В конце 1940 – 1950-х гг. Г.В. Железняковым [Железняков, 1981] был вскрыт эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, теоретический анализ которого был выполнен В.Н. Гончаровым [Гончаров, 1962]. Позднее Н.Б. Барышниковым [Барышников, 1984] была разработана типизация процессов взаимодействия потоков (рис. 1).

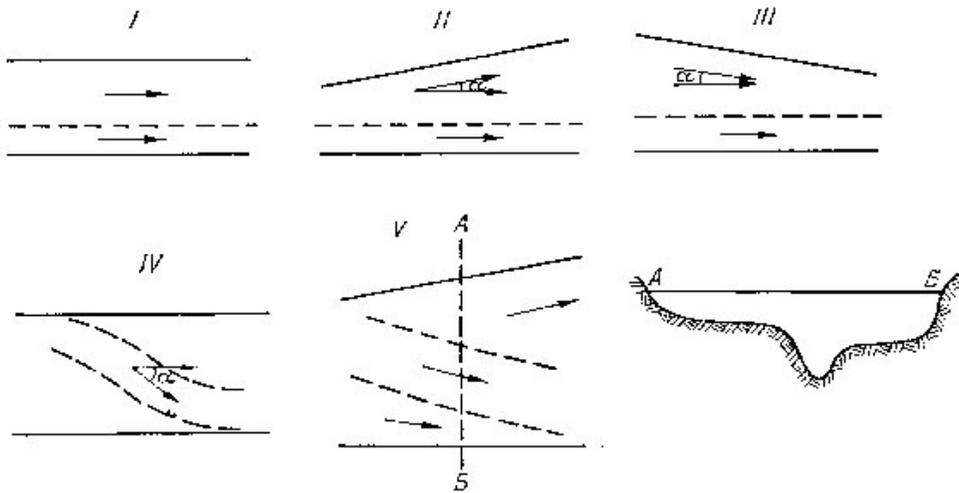


Рис. 1. Схема взаимодействия русловых и пойменных потоков:

*I* – параллельность осей потоков; *II* – расходящиеся оси; *III* – сходящиеся оси; *IV* – пересечение осей; *V* – то же, что и *IV*, но при разновысотных поймах.

Этот эффект приводит к изменению пропускной способности как русловой, так и пойменной составляющих. Поэтому на первом этапе различными авторами [Барышников, 1999, 2006 и др.] было предложено вводить к русловой ( $\kappa_p$ ) и пойменной ( $\kappa_n$ ) составляющим потока корректирующие множители в виде:

$$Q = \kappa_p Q_p + \kappa_n Q_n \text{ или } Q = \kappa(Q_p + Q_n), \quad (2)$$

где  $\kappa_p < 1$ ;  $\kappa_n > 1$  и  $\kappa < 1$ . Многочисленные формулы для определения этих коэффициентов, предложенные различными авторами [Карасев, 1980; Ле Ван Киен и др.], как правило, были получены на основе лабораторных исследований на моделях с параллельными осями взаимодействующих потоков. Поэтому существенного значения для практических расчётов они не имели.

В 1965 г. Д.Е. Скородумов предложил использовать для расчётов уравнение движения потока с переменным по длине расходом воды в виде:

$$I = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{\alpha_{KH} v_H^2 - \alpha_{KB} v_B^2}{2gL} + \frac{v - v_g}{gF} + \frac{\alpha_B}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} . \quad (3)$$

Позднее эта методика была уточнена Н.Б. Барышниковым для бесприоточного участка [Барышников, 2007], который предложил использовать в ней не одно уравнение, а их систему в виде:

$$I_p = \left( \frac{v^2}{C^2 h} \right)_p + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)_p + \left( \frac{q' v'}{gF'} \right)_p + \left[ \frac{\partial(\alpha_B v)}{\partial t} \right]_p ; \quad (4)$$

$$I_n = \left( \frac{v^2}{C^2 h} \right)_n + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)_n + \left( \frac{q' v'}{gF'} \right)_n + \left( \frac{\alpha_B \partial v}{g \partial t} \right)_n ; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(Q_p + Q_n)}{\partial x} + \frac{\partial(F_p + F_n)}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

где  $\alpha_K$  и  $\alpha_B$  – соответственно коэффициенты Кориолиса и Буссинеска;  $v'$ ;  $q'$  и  $F'$  – соответственно скорости, удельные расходы воды и площади продольного сечения при массообмене между русловым и пойменным потоками.

К сожалению, применение данной системы уравнений для расчётов пропускной способности пойменных русел крайне ограничено из-за отсутствия методики расчёта параметров, учитывающих массообмен между взаимодействующими потоками.

Учитывая такое положение с расчётами пропускной способности пойменных русел, на кафедре гидрометрии была разработана эмпирическая методика [Барышников, 1984, 1999], основанная на натурных данных примерно по 30 постам в основном Росгидромета и на графических зависимостях вида:  $V_p/V_{p,б} = f(h_p / h_{p,б}, \alpha)$  (рис. 2) для русловой части потока и  $Q_n / (Q_p + Q_n) = f[F_n / (F_p + F_n); n_n / n_p; \beta]$  (рис. 3) для пойменной, где  $\beta$  – параметр, характеризующий тип взаимодействия потоков.

В то же время положение расчётных кривых зависимости для русловой части потока для условий параллельности его динамической оси, оси пойменного потока вполне справедливо было уточнено Е.В. Польциной (рис. 4) [Барышников, 2006, 2006а и др.]. По-видимому, нуждается в дальнейшем уточнении и положение расчётных кривых для пойменной составляющей потока. Однако в настоящее время данное направление исследований нельзя признать перспективным из-за низкой точности и высокой стоимости натурных данных, в частности, в подразделениях Росгидромета.

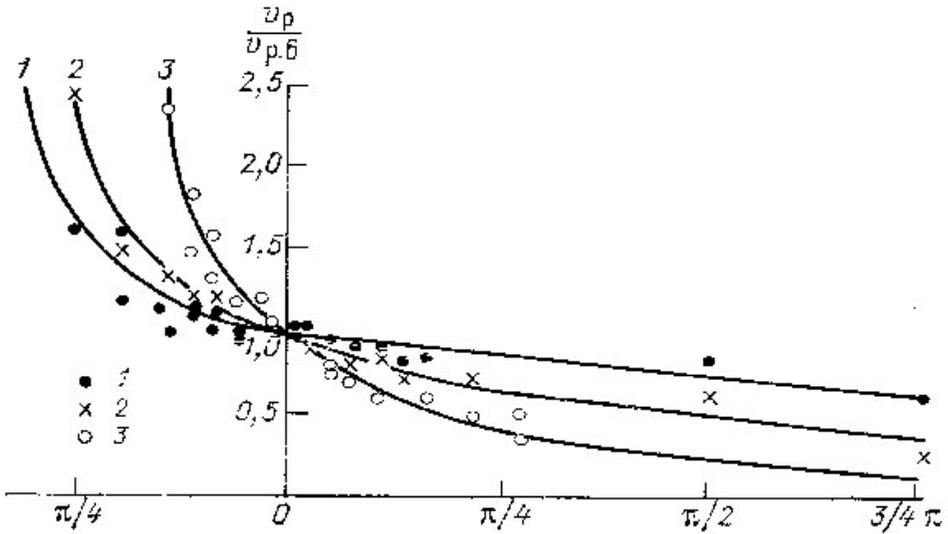


Рис. 2. Кривые  $V_p/V_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ : 1 -  $h_p/h_{p,б} = 1,10$ ; 2 -  $h_p/h_{p,б} = 1,25$ ; 3 -  $h_p/h_{p,б} = 1,50$ .

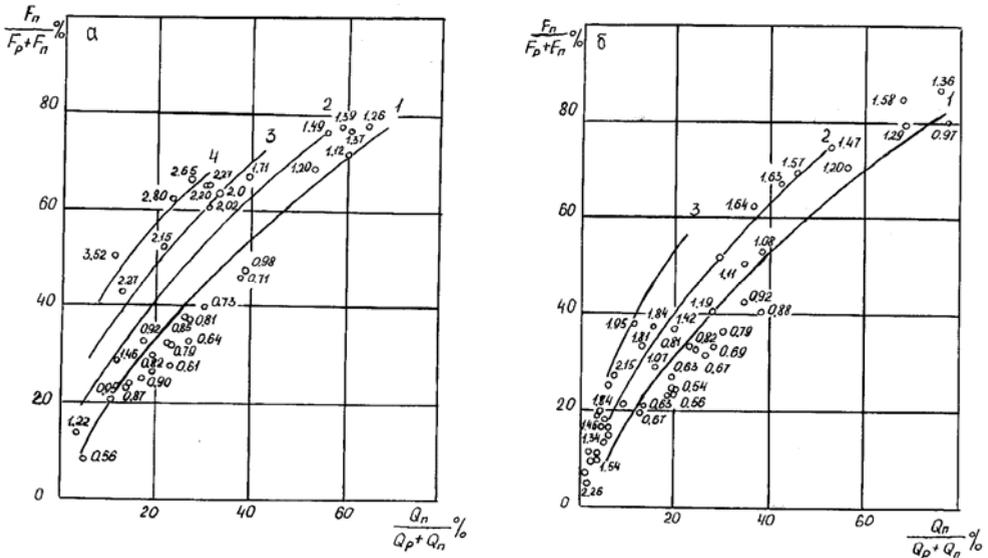


Рис. 3. Кривые  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(F_n/(F_p + F_n), n_n/n_p)$ :

а и б - соответственно третий и второй типы взаимодействия потоков.

Около точек значения  $n_n/n_p$ : 1 -  $n_n/n_p = 1,0$ ; 2 -  $n_n/n_p = 1,5$ ; 3 -  $n_n/n_p = 2,0$ ; 4 -  $n_n/n_p = 2,5$ .

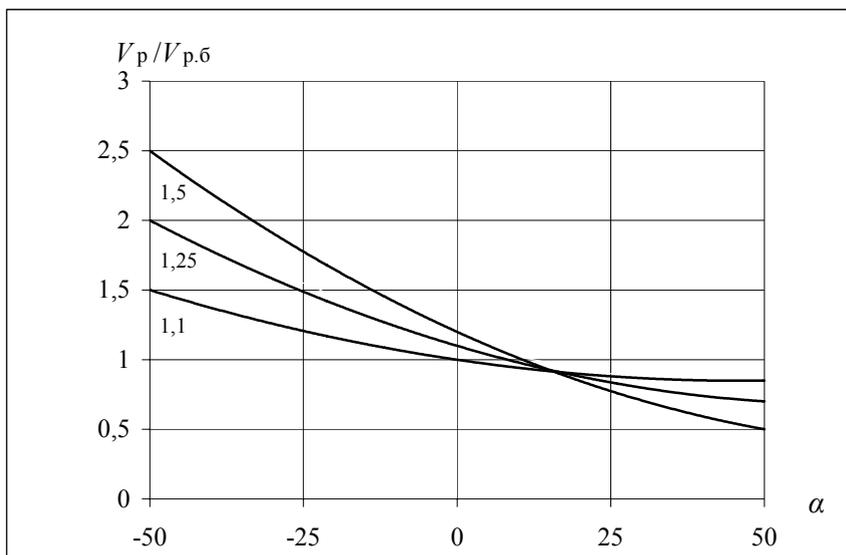


Рис. 4. Зависимости  $V_p/V_{p.б} = f(\alpha)$  для соотношения  $h_p/h_{p.б} = 1,1; 1,25$  и  $1,5$ .

Поэтому, по нашему мнению, наиболее перспективным является дальнейшее совершенствование методики, основанной на применении системы уравнений неразрывности и движения потока с переменным по длине расходом воды, в частности, в виде, предложенном Д.Е. Скородумовым (3) или Н.Б. Барышниковым (4) – (5).

Обозначим инерционные члены левой части уравнений (3) – (5) через  $\varepsilon_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)$ ;  $\varepsilon_2 = \frac{q'v'}{gF'}$  и  $\varepsilon_3 = \frac{\partial(\alpha_B v)}{\partial t}$  и отметим, что по данным, полученным на кафедре гидрометрии [Барышников, 1999], наибольшее значение  $\varepsilon_3/I = 5\%$ , что значительно меньше точности натуральных данных. Поэтому в расчётах этим параметром можно пренебречь. В то же время величины  $\varepsilon_1/I$  и  $\varepsilon_2/I$  являются вполне значимыми и даже по данным, полученным только по двум рекам, могут соответственно достигать 55 и 19,5% [Барышников, 2007; Скородумов, 1965].

Исходя из этого, с целью получения дополнительных данных нами были проведены экспериментальные исследования на установке размерами  $11,0 \times 2,5$  м и постоянным уклоном дна равным 1%. На ней из бетона была смонтирована модель русла прямоугольного сечения (шириной 0,3 м и глубиной 0,05 м) с поймой – тоже прямоугольного сечения с переменной до 2,10 м шириной. На первом этапе изучался второй тип взаимодействия потоков (см. рис. 1), т.е. при их расходящихся осях. При этом измерения параметров потоков осуществлялись на трёх гидростворах, расположенных на расстоянии 3; 5 и 7 м от входного створа.

При проведении экспериментов была применена методика измерений, разработанная в РГГМУ, при которой измерения осуществлялись сначала в русловом и пойменном потоках, изолированных друг от друга стеклянной продольной перегородкой, установленной на бровке русла, затем перегородка удалялась и измерения повторялись, но уже при взаимодействии потоков. Измерения осуществлялись при различных уровнях примерно через 1 см. Помимо этого определялась величина вектора скорости на бровке русла (через 1 м) с помощью микровертушки и специального флюгера. Основной задачей экспериментов являлось получение объективной информации для определения зависимости первого и второго инерционных членов уравнений (3) – (5) от угла  $\alpha$  – расхождения динамических (геометрических) осей потоков. Экспериментальные исследования были выполнены при трёх углах расхождения динамических осей потоков. В частности, в таблице приведены некоторые характеристики потоков и русла, необходимые для расчёта и построения графических зависимостей вида  $\varepsilon_1 / I = f(\alpha)$  и  $\varepsilon_2 / I = f(\alpha)$ .

Таблица

h, см	$\frac{h}{h_{p,б}}$	$\varepsilon_1 / I$			$\varepsilon_2 / I$		
		Угол расхождения $\alpha$ , °					
		5	10	20	5	10	20
5,1	1,02	0,1	2,6	3,4	–	1,2	1,6
6,0	1,2	0,2	8,1	17,0	0,1	2,1	3,0
7,0	1,4	3,0	30,0	33,5	0,3	2,9	7,2
8,0	1,6	27,2	43,2	51,2	2,4	5,0	12,0
9,0	1,8	39,8	51,2	69,8	4,9	7,4	16,5
10,0	2,0	56,1	72,1	80,1	7,4	10,2	24,2

Как вытекает из анализа данных, приведённых в таблице, наблюдается довольно чёткая зависимость инерционных членов уравнений (3) или (4) от угла  $\alpha$ . Действительно, при значении угла  $\alpha = 5^\circ$  наибольшие значения  $\varepsilon_1 / I = f(\alpha) = 56,1$  и  $\varepsilon_2 / I = f(\alpha) = 7,4$ , а при  $\alpha = 20^\circ$  соответственно 80,1 и 24,2. Аналогичная зависимость этих членов уравнения наблюдается и от глубины руслового потока. Так, при наибольших глубинах последнего и угле  $\alpha = 20^\circ$  значения  $\varepsilon_1 / I$  и  $\varepsilon_2 / I$  соответственно составляют 80,1 и 24,2, а при малых глубинах затопления поймы соответственно 3,4 и 1,6.

Анализ данных таблицы позволяет выдвинуть предположение о том, что значения  $\kappa_p$  и  $\kappa_{п}$  в формуле (1) также должны зависеть и от угла  $\alpha$ . Действительно,

$$\kappa_p = \frac{Q_p}{Q'_p} = \frac{v_p}{v'_p},$$

где  $Q'_p, v'_p$  и  $Q_p, v_p$  – соответственно расходы и средние скорости руслового потока в условиях его изоляции от пойменного потока ( $Q'_p, v'_p$ ) и при взаимодействии с ним ( $Q_p, v_p$ ).

Учитывая, что установлена довольно чёткая и надёжная графическая зависимость  $V_p / V_{p,б} = f(h_p / h_{p,б}, \alpha)$  (см. рис. 2 и 4), необходимо сопоставить значения  $V_p / V'_p$  и  $V_p / V_{p,б}$ . По-видимому, они близки между собой. Учитывая, что  $V_{p,б}$  – средняя скорость руслового потока при уровне, предшествующем затоплению бровки прируслового вала, величина для каждого гидроствора постоянная, с учётом формулы Шези – Маннинга представим  $V'_p$  в виде  $V'_p \approx \alpha h_p^{3/2}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что оба эти параметра  $V_p / V'_p$  и  $V_p / V_{p,б}$  в основном зависят как от средней глубины потока, так и от угла между динамическими осями взаимодействующих потоков.

Исходя из этого, можно утверждать, что экспериментальные исследования и анализ, выполненный на их основе, позволил выделить два направления в разработке методики расчётов пропускной способности пойменных русел. Первое направление основано на анализе системы уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды, второе – на разработке зависимости коэффициента  $k_p$  от определяющих факторов. Данные исследования целесообразно продолжить как на основе лабораторных экспериментов, в частности, при сходящихся динамических осях взаимодействующих потоков, так и на основе натуральных данных.

### **Литература**

1. Барышников Н.Б. Речные поймы (морфология и гидравлика). – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 152 с.
2. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.
3. Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Антропогенное воздействие на саморегулирующую систему «бассейн – речной поток – русло». – СПб.: изд. РГГМУ, 1999. – 218 с.
4. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.
5. Барышников Н.Б., Польцина Е.В., Кузнецова Е.Н. Антропогенное воздействие на пойменные процессы. // В сб.: Поймы и пойменные процессы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006а, с. 39–47.
6. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
7. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
8. Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
9. Ле Ван Киен. О гидравлическом расчёте пойменных русел. – Гидротехника и мелиорация, 1968, № 9, с. 50–52.
10. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. – М.: Транспорт, 1972. – 280 с.
11. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. // Тр. ГГИ, 1965, вып. 128, с. 3–97.