

*Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина*

**УЧЁТ ОСОБЕННОСТЕЙ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ  
РАСЧЁТНОГО УЧАСТКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОПУСКНОЙ  
СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ С ПОЙМАМИ**

*N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina*

**DETERMINATION OF THE FLOODPLAIN RIVER CHANNELS  
DISCHARGE CAPACITY BASED ON MORPHOLOGICAL  
PATTERNS OF THE CONSIDERED RIVER SECTION**

*Выполнен анализ влияния особенностей морфологического строения русел и пойм на гидравлику потоков в них. Рекомендована методика оценивания веса инерционных членов уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды на основе сведений о морфометрических характеристиках русел и пойм.*

*Ключевые слова: русло, пойма, морфометрические характеристики, инерционные члены, уклон свободной поверхности.*

*Analysis of influence of river channels and floodplains' morphologic patterns on hydraulic characteristics of the flow is performed in this paper. A methodology of the inertial terms estimation is proposed for the motion equation that describes streams with variable water discharge based on morphological parameters of river channels and floodplains.*

*Keywords: river bed, floodplain, morphometric characteristics, inertial terms, water surface slope.*

Резкое обострение циклонической деятельности в последние годы, в частности над европейским континентом, привело к значительному увеличению числа и главной мощности катастрофических паводков. В качестве примера можно привести паводки, прошедшие на территории Польши и Германии в 1997 году, существенно превысившие паводки предшествующего периода. Так на реке Висле предшествующий наивысший паводок, близкий к 1<sup>0</sup>/<sub>0</sub> – обеспеченности, наблюдался в 1926 году. Паводок же 1997 года, значительно его превысивший, был оценён польскими специалистами вероятностью 1 раз в 300–1000 лет, т.е. 0,33–0,1<sup>0</sup>/<sub>0</sub> обеспеченности. Однако в 2010 году на реке Висле прошёл ещё больший паводок, значительно превысивший паводок 1997 года и затопивший не только несколько небольших городов, но даже частично и такие большие города как Краков и Варшаву. При этом было разрушено несколько мостов и других гидротехнических сооружений. Это, в частности, свидетельствует о необходимости совершенствования расчётных методик, основанных на данных о максимальных расходах воды редкой обеспеченности. Последние, к сожалению, как правило, не измеряются.

Методы расчётов, в частности, рекомендуемые нормативными документами основаны либо на теории равномерного движения [Наставление НИМП –

72 и др.], либо на теории неравномерного, неустановившегося движения [Барышников, 1984, 2008]. В первом случае расчёты выполняются на основе формулы Шези  $v = C\sqrt{hI}$ . В этой методике используются следующие морфометрические характеристики: глубина, ширина и площадь водного сечения как русел, так и пойм. При применении к пойменным руслам, к сожалению, результаты расчётов имеют большие погрешности, значительно превышающие допустимые пределы. Это привело к необходимости совершенствования этих методов, в частности, на основе уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды, которое для русел с односторонними поймами имеет вид:

$$I_p = \left( \frac{v^2}{C^2 h} \right)_p + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)_p + \left( \frac{q' v'}{g F'} \right)_p + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha_B v}{g} \right)_p \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial(Q_p + Q_n)}{\partial x} + \frac{\partial(F_p + F_n)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Здесь  $v$ ,  $I$ ,  $F$  – соответственно скорость, уклон свободной поверхности и площадь водного сечения;  $\alpha_K$  и  $\alpha_B$  – коэффициенты Кориолиса и Буссинеска;  $q'$  – удельный расход воды за счёт массообмена между русловым и пойменным потоками;  $v'$  и  $F'$  – скорости массообмена между этими потоками и площадь продольного сечения, на которой происходит этот массообмен; «р» и «п» – индексы, означающие, что параметры относятся к русловому или пойменному потокам.

Обозначив второй, третий и четвёртый члены уравнений (1) и (2) соответственно через  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  и назвав их инерционными [Скородумов, 1965], выражение для средней скорости потока можно представить в виде:

$$v = C\sqrt{hI\left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)}. \quad (4)$$

Необходимо оценить веса инерционных членов этих уравнений и при их значимых величинах выявить влияние на них особенностей морфологического строения русел и пойм на расчётном участке. Коэффициент Шези  $C$  некоторые авторы [Гончаров, 1962 и др.] называли коэффициентом формы сечения, т.е. он находится в прямой зависимости как от формы сечения, так и от других морфометрических характеристик русла и поймы. Общий вид формулы  $C = f(R, n, B/h)$ , здесь гидравлический радиус  $R$  и коэффициент сечения  $B/h$

являются основными морфометрическими характеристиками русел и пойм. Расчёты, проведённые различными авторами на основе натуральных [Скородумов, 1965] и лабораторных данных [Барышников, 1989, 2007], показали, что наибольшая величина первого инерционного члена ( $\varepsilon_1/I$ ) составляет 55% по натурным данным [Скородумов, 1965] и 80% по данным лабораторных исследований на установке, где оси русла и поймы сходились или расходились под углами  $5^\circ$ – $20^\circ$  [Барышников и др., 2008] т.е. является вполне значимой. Более того, была установлена прямая зависимость первых двух инерционных членов уравнения от угла  $\alpha$  и средней глубины руслового потока вида  $\frac{\varepsilon_1}{I} = f(\operatorname{tg}\alpha, h_p / h_{p,\delta})$  и

$\frac{\varepsilon_2}{I} = f(\operatorname{tg}\alpha, h_p / h_{p,\delta})$ . Следует отметить, что при больших углах  $\alpha \geq 90^\circ$ , русло реки, как правило, полностью заносится наносами и в нём прекращается движение руслового потока [Великанова З.М., 1980]. Более того, при углах  $\alpha > 90^\circ$ , как это показали натурные исследования [Карасёв, 1980], в русле при его частичном занесении наносами наблюдается обратное течение руслового потока.

Аналогичные расчёты были проведены и для оценки веса второго инерционного члена  $\varepsilon_2$  на основании натуральных данных по рекам Луге и Пьяне. Наибольшее значение  $\varepsilon_2 / I$  составило 20%, а по данным лабораторных измерений 25%, т.е. также значимая величина [Барышников, 2007]. Аналогичные расчёты выполнены и для оценки третьего инерционного члена на основе натуральных данных более чем по 50 рекам. Средняя величина  $\varepsilon_3 / I$  составила доли процента при наибольшем значении в 5%, т. е. этой величиной вполне можно пренебречь [Барышников, 1978].

Таким образом из трёх инерционных членов уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды только два являются значимыми. По-видимому, нестационарность движения не полностью учитывается третьим инерционным членом уравнений [Барышников, 2007]. Если морфометрические характеристики руслового потока разработаны давно и достаточно успешно используются в расчётных уравнениях, то с аналогичными характеристиками пойм дело обстоит значительно сложнее. Это обусловлено сложным морфологическим строением пойм и, что особенно важно, изменением их морфометрических характеристик по длине и с уровнем воды. Такие характеристики пойм как средняя глубина, ширина, да и площадь сечения, особенно при меандрирующих типах пойм, при изменении уровней воды имеют ступенчатый вид. Действительно, при затоплении каждой последующей «ступеньки» пойм, как правило резко увеличиваются ширины и площади поперечного сечения и соответственно резко уменьшаются средние глубины. Ещё более сложным является характер изменения морфометрических характеристик пойм по длине. По определению Н.И. Маккавеева, поймы в плане имеют «чётковидный» характер

[Маккавеев, 1965], т.е. их ширина и другие характеристики значительно изменяются по длине реки. Таким образом, морфометрические характеристики пойм – несовершенны и не только не отражают особенности изменения морфологии пойм при увеличении уровней воды, но и, что является особенно важным, они не отражают особенностей изменения морфологического строения пойм по длине реки. В то же время эти морфометрические характеристики являются основными расчётными параметрами при расчётах пропускной способности пойм и пойменных русел. Это играет решающую роль особенно при расчётах катастрофических расходов воды. Поэтому важным явилось введение автором в качестве расчётной интегральной характеристики – угла  $\alpha$ , между динамическими осями руслового и пойменного потоков [Барышников, 1984]. Определение этого угла по данным натурных измерений – сложная задача, так как для этого необходимо иметь натурную информацию не только по измерениям расходов воды детальным способом, но и сведения о векторах скоростей на бровке прируслового вала и данных измерений на втором, близко расположенном гидростворе. Поэтому автором была разработана методика определения этого угла  $\alpha$  на основе крупномасштабных картографических данных [Барышников, 1984, 2007]. При этом было сделано допущение, что угол между динамическими осями взаимодействующих потоков был принят равным углу между геометрическими осями русла и поймы.

Следует признать, что угол  $\alpha$ , хотя и является важной интегральной морфометрической характеристикой, но он не полностью отражает особенности морфологического строения пойм. Другими расчётными морфометрическими характеристиками пойм могут быть характеристика формы поперечного сечения поймы  $B/h$ , и возможно морфометрические характеристики пойменных массивов, предложенные И.В. Поповым [Поповым, 1969]. Однако попытки использовать эти характеристики в качестве расчётных успеха не имели.

Вторым, пожалуй, главным, недостатком расчётных методик является отсутствие данных, да и самой методики измерений уклонов свободной поверхности пойменных потоков. Поэтому при расчётах пропускной способности пойм приходится уклон свободной поверхности пойменных потоков приравнять уклонам свободной поверхности русловых потоков, что приводит к большим погрешностям расчётов.

Уклоны свободной поверхности пойменных, а так же и русловых потоков, при их взаимодействии с пойменными, находятся в прямой зависимости от морфометрических характеристик русел и пойм. Действительно, как это установлено в работах автора [Барышников, 1984, 2007], уклон свободной поверхности руслового потока, при его взаимодействии с пойменным потоком находится в прямой зависимости от угла  $\alpha$  и относительной глубины  $h_p / h_{p,\delta}$  руслового потока (рис. 1).

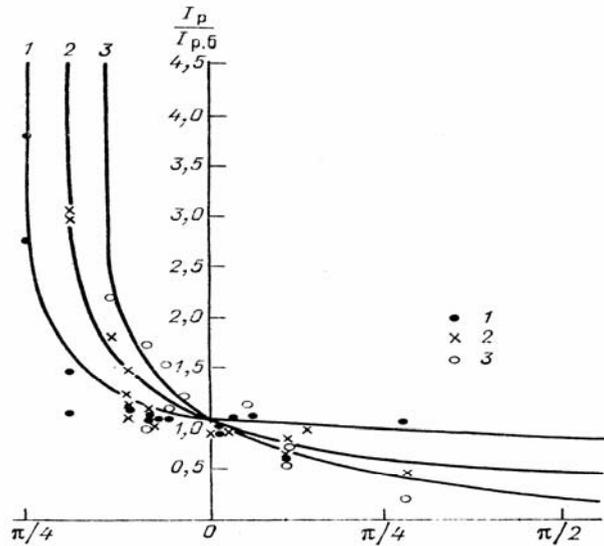


Рис. 1. Кривые  $I/I_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ . 1 –  $h_p/h_{p,б} = 1.10$ ; 2 –  $h_p/h_{p,б} = 1.25$ ; 3 –  $h_p/h_{p,б} = 1.50$ .

Проведённый анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы и предложения:

- гидрологические характеристики русловых и пойменных потоков определяются особенностями морфологического строения русел и пойм на расчётном участке и, в конечном итоге, находятся в прямой зависимости от морфометрических характеристик;
- морфометрические характеристики русел можно признать достаточно хорошо разработанными и широко используемыми в гидрологических расчётах;
- морфометрические характеристики пойм недостаточно учитывают особенности их морфологического строения. Существенным достижением, позволившем усовершенствовать методику расчётов средних скоростей русловых потоков при их взаимодействии с пойменными, явилось введение в качестве интегральной характеристики особенностей морфологического строения русел и пойм, угла  $\alpha$  между динамическими осями русловых и пойменных потоков;
- большое значение имеет усовершенствование методики определения этого угла  $\alpha$ , основанной на крупномасштабных планово-высотных картографических материалах;
- необходимы дальнейшие глубокие проработки, направленные на разработку методов измерений и расчётов уклонов свободной поверхности пойменных потоков, основанных на особенностях морфологического строения пойм и русел;
- необходима разработка новых или совершенствование имеющихся морфометрических характеристик пойм, учитывающих особенности их морфологи-

ческого строения не только в створе измерений, но и на расчётном участке значительной длины.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1079 от 24 августа 2009 г.) по направлению «География и гидрология суши»

### **Литература**

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. – 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 саморегулирующуюся систему бассейн – речной поток – русло – СПб.: РГГМУ, 1999. – 218 с.
4. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.
5. Барышников Н.Б., Пагин А.О., Польшина Е.В., Селина Т.С. Учёт кинематического эффекта в методах расчёта пропускной способности пойменных русел. // Метеорология и гидрология, 2008, №10. – с.80–85.
6. Великанова З.М., Ярных Н.А. натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье // Труды ГГИ, 1970 вып. 183, с.35–83.
7. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 375 с.
8. Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
9. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. – М.: Транспорт, 1972. – 280 с.
10. Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство – Л: Гидрометеиздат, 1969. – 363 с.
11. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Труды ГГИ, 1965 вып. 128, с.23–96