

Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина, Ю.В. Демидова

КОЭФФИЦИЕНТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina, Yu.V. Demidova

ROUGHNESS COEFFICIENTS OF RIVERBEDS

Выполнен анализ методов расчётов максимальных расходов воды, основанных на использовании меток высоких вод и коэффициентов шероховатости русел и пойм. Вскрыты недостатки этих методов и, в частности, определения этих коэффициентов как в речных руслах простых форм сечения, так и в руслах с поймами. Предложены пути совершенствования расчётных методик.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости, максимальный расход, русло, пойма, сечение, метки высоких вод

In this paper, analysis of methods of the maximum water discharges computation based on the use of marks of high water and roughness coefficients of riverbeds and floodplains is performed. Disadvantages of those methods and, in particular, of the roughness coefficients determination for riverbeds with simple cross-sections and for riverbeds with floodplains are revealed. Ways of improvements of those approaches are proposed.

Key words: roughness coefficient, maximum discharge, riverbed, floodplain, cross-section, marks of high water.

Максимальные расходы воды являются одной из важнейших гидрологических характеристик при проектировании различных гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий. Все методы их расчётов, включая и статистические, основаны на натурной информации. К сожалению, качество последней низкое, начиная с периода, предшествующего перестройке, и по настоящее время. Это обусловлено в первую очередь тем, что, как правило, максимальные расходы, и особенно катастрофические, по разным причинам не измеряются. Действительно, на равнинных реках они обычно проходят при затопленной пойме, часто при ледоходе и других плавающих предметах, что представляет большую опасность жизни измерителям. Именно это приводит к тому, что довольно часто требования техники безопасности запрещают производить измерения в таких условиях. Вторым фактором является быстротечность их прохождения. Учитывая, что малые и средние реки недостаточно изучены, часто на них отсутствуют посты и станции Росгидромета, это приводит к необходимости расчётов максимальных расходов воды на основе данных о метках высоких вод и морфометрических характеристиках русел и пойм. Наставление [НИМП-72] рекомендует при этом использовать методику расчётов, основанную на формуле Шези $v = C\sqrt{hI}$, т.е. априори допуская, что движение потока является квазиравномерным. Одним из основных параметров в этой формуле является коэффициент Шези. Для его расчётов обычно используются различные формулы, которых в настоящее время насчитывается более двухсот. Не оста-

навливаясь на анализе этих формул, так как он неоднократно выполнялся рядом авторов [Железняков, 1981; Карасёв, 1980], отметим лишь, что наиболее простыми, а потому и наиболее часто применяемыми, являются формулы Маннинга $C = \frac{h^{1/6}}{n}$ и Павловского $C = \frac{h^y}{n}$. Определять коэффициенты шероховатости n по описательной характеристике расчётного участка обычно рекомендуется по одной из соответствующих таблиц. Наиболее распространёнными из них являются таблицы И.Ф. Карасёва и М.Ф. Срибного в России и В.Т. Чоу и Дж. Бредли в США. Коэффициенты шероховатости являются интегральной характеристикой всех видов сопротивлений. Основными их недостатками являются неопределённость размерности и субъективизм при их определении по соответствующим таблицам. Действительно, описательная характеристика расчётного участка недостаточно точна, к тому же в таблицах Чоу и Бредли приводится три значения этого коэффициента, отличающихся между собой на 20–30 % [Барышников, 2003].

В РГГМУ на основе данных измерений в русловых потоках в беспойменных руслах более чем на 500 постах Росгидромета были выполнены расчёты с целью оценки эффективности методики, основанной на формулах Шези и Маннинга или Павловского и таблицах для определения коэффициентов шероховатости. При этом оценка выполнена для всех указанных таблиц (Срибного, Карасева, Чоу и Бредли). Результаты этой оценки приведены в таблице.

Среднеквадратические и максимальные величины отклонений табличных коэффициентов шероховатости от их расчётных значений (в % от n_p)

Группа рек	Количество рек	$\Delta n/n_p = (n_p - n_r) / n_p$							
		по Срибному		по Чоу		по Бредли		по Карасёву	
		$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{max}}{n_p}$
Равнинные	317	34,7	173	36,2	218	35,8	321	34,8	165
Горные и полугорные	185	31,9	208	30,8	203	32,4	255	31,7	210
Осредненные	502	33,7	208	34,1	218	35,1	321	37,8	210

Здесь Δn – осредненная величина отклонений табличных значений коэффициентов шероховатости от расчётных (по натурным данным).

Как вытекает из анализа данных, приведённых в таблице, средняя погрешность расчётов по всем четырём использованным в расчётах таблицам для определения коэффициентов шероховатости составляет 31–36 % при максимальных погрешностях, значительно превышающих 100 %. Это свидетельствует о низкой эффективности расчётной методики и необходимости её совершенствования. Более того, дальнейшие исследования, проведённые в РГГМУ [Барыш-

ников, 2003 и 2007], показали, что на малых и средних реках коэффициенты шероховатости изменяются в несколько раз при изменении глубин, что не учитывается ни одной из расчётных формул. В зависимости от состояния берегов и расположения русловых образований относительно расчётного створа коэффициенты шероховатости могут как увеличиваться, так и уменьшаться. В связи с этим для малых и средних рек было выделено четыре типа зависимостей

$\frac{n_p}{\bar{n}_p} = f\left(\frac{h_p}{h_p}\right)$ и пятый тип – для больших рек (рис. 1).

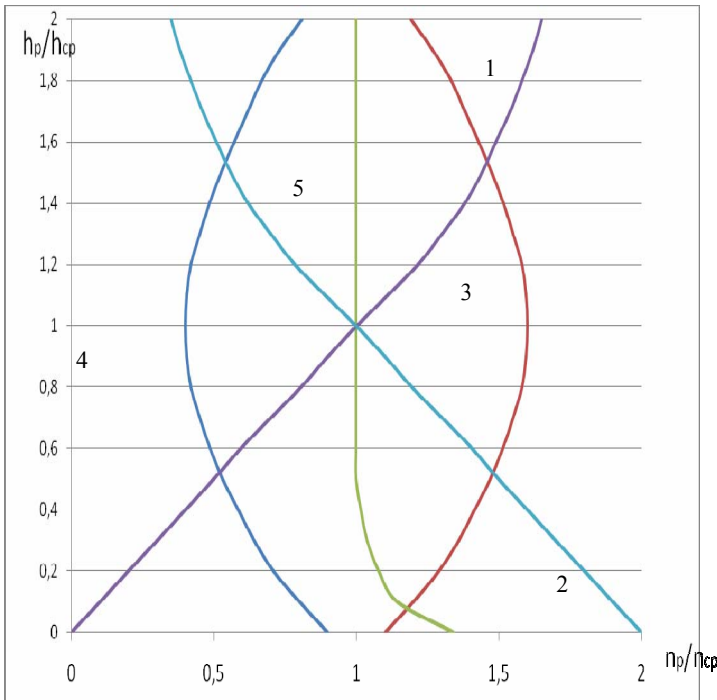


Рис. 1. Зависимости $\frac{n_p}{\bar{n}_p} = f\left(\frac{h_p}{h_p}\right)$; 1–5 типы кривых

Такие типы кривых характерны как для равнинных, так и для горных рек. Как видно на рис. 1, первый тип кривой характеризуется увеличением значений коэффициентов шероховатости речных русел при увеличении глубин. Такой характер изменения коэффициентов шероховатости приходит в противоречие практически со всеми известными формулами. Действительно, в соответствии с последними, в частности Маннинга или Павловского, коэффициенты шероховатости должны уменьшаться при увеличении глубин, а они, наоборот, увеличиваются. Более того, не в степени, близкой к 0,2, а в несколько раз. Такой характер изменения коэффициентов шероховатости можно объяснить влиянием бере-

гов на малых и средних равнинных реках или расположением русловых образований относительно расчётного створа. На горных реках вместо растительности берега могут быть «засорены» крупнообломочным материалом.

Второй тип кривых характеризуется уменьшением значений коэффициентов шероховатости при увеличении глубин, что вполне соответствует большинству расчётных формул. Однако величина этого уменьшения в несколько раз, а иногда и на порядок, больше расчётной.

Третий и четвёртый типы кривых занимают промежуточное положение. Действительно, при третьем (четвёртом) типе кривых сначала наблюдается увеличение глубин, а затем их уменьшение (увеличение). Такой вид кривых можно объяснить как зарастаемостью берегов на равнинных реках или их засорённостью – на горных, так и воздействием русловых образований при их расположении выше или ниже расчётного створа. Действительно, до определённого уровня берег реки сильно зарос растительностью или засорён. При дальнейшем повышении уровня растительность на берегах отсутствует или берег расчищен.

Ещё более сложной является проблема определения коэффициентов шероховатости для пойменных русел и самих пойм, с учётом эффекта взаимодействия в зоне воздействия руслового и пойменных потоков. Последний был вскрыт в работах в основном отечественных исследователей [Гончаров, 1962; Железняков, 1981; Барышников, 1984]. Не останавливаясь на детальном анализе воздействия этого эффекта на гидравлические сопротивления, так как он выполнен в работах одного из авторов [Барышников, 1984, 2007, 2008], отметим лишь, что под воздействием этого эффекта коэффициенты шероховатости могут как существенно увеличиваться, так и уменьшаться. Н.Б. Барышниковым на основе достаточно надёжных натурных данных была сделана попытка получить для пойменных русел аналогичные скоростям $v_p/v_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ и уклонам водной поверхности $I_p/I_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ зависимости вида $n_p/n_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ (рис. 2).

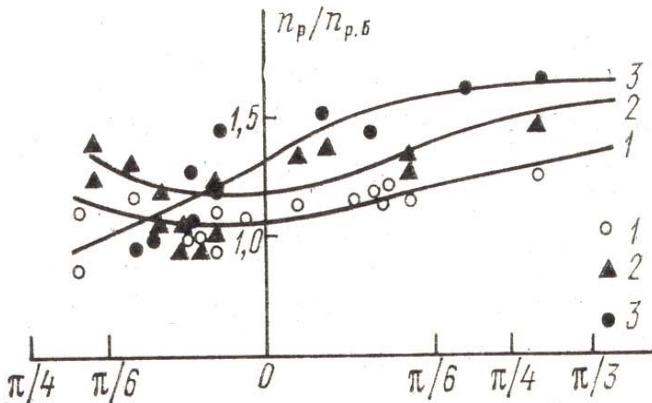


Рис. 2. Кривые $n_p/n_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$. 1 – $h_p/h_{p,б} = 1,10$; 2 – $h_p/h_{p,б} = 1,25$; 3 – $h_p/h_{p,б} = 1,50$

Здесь α – угол между динамическими осями взаимодействующих русловых и пойменных потоков; индексы «р.б.» и «р.» показывают, что расчётные параметры определены при уровнях затопления бровок прирусловых валов «р.б.» и более высоких уровнях «р.».

Как видно на рис. 2, чёткой зависимости, такой же как зависимости $v_p/v_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ или $I_p/I_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$, не наблюдается.

Учитывая, что большинство рек России равнинные и, как правило, имеют широкие поймы, служащие для пропуска особенно высоких и тем более катастрофических паводков, наиболее острой является проблема расчёта пропускной способности пойм.

В то же время качество натурной информации о пойменных расходах оставляет желать лучшего. Действительно, расходы воды на поймах в системе Росгидромета даже в лучшие годы либо вообще не измерялись, либо количество скоростных вертикалей на них резко сокращалось, несмотря на более сложный, чем в руслах рельеф пойм. В качестве примера можно привести р. Ветлугу у д. Быстри: при измерении максимального расхода на её пойме, ширина которой немного менее километра, ограничились всего двумя вертикалями, хотя в русловой части потока шириной 60 м их количество равнялось шести. Другими важными факторами являются отсутствие измерений уклонов водной поверхности на поймах и воздействие руслового потока на поток поймы. Последнее заключается в том, что верхние слои руслового потока в периоды подъёма уровней, имеющие большие скорости течения, поступая на пойму, приводят к тому, что при расчётах на основе формулы Шези значения коэффициентов шероховатости существенно снижаются до значений 0,012–0,016, хотя в соответствующих таблицах минимальные значения коэффициентов шероховатости составляют 0,025–0,030, т.е. в два раза больше фактических. По-видимому, при расчётах коэффициентов шероховатости пойм целесообразно использовать методику, предложенную Б.В. Поляковым [Поляков, 1946], заключающуюся в делении поймы на отдельные отсеки с различными значениями коэффициента шероховатости. Осреднённое для поймы в целом его значение получают как средневзвешенное, т.е.

$$\bar{n}_n = \frac{\sum n_i b_i}{B_n}.$$

Здесь n_i – значения коэффициентов шероховатости для участков поймы шириной b_i и B_n – ширина поймы.

При такой методике возникает проблема определения ширины участка, находящегося под воздействием руслового потока. По данным Г.В. Железнякова [Железняков, 1981] и В.Н. Гончарова [Гончаров, 1962], ширина этого участка, определённая по данным исследований на моделях русла с гладкими поймами, составляла 5–6 ширин русла. Однако результаты исследований Н.Б. Барышникова [Барышников, 2007] на основе натуральных данных позволили установить,

что ширина этого участка зависит от шероховатости поймы и составляет 1,5–4 ширины русла.

Таким образом, проведённый анализ и расчёты, выполненные на основе натурных и лабораторных данных, позволяют сделать следующие выводы и предложения:

– при расчётах максимальных расходов воды на основе меток высоких вод и таблиц для определения коэффициентов шероховатости средние погрешности расчётов скоростей для беспойменных русел составляют 31–36 % при их максимальных значениях, превышающих сотни процентов;

– для пойменных русел снижение погрешностей расчётов возможно при учёте эффекта воздействия пойменного потока на русловой;

– при подсчёте расходов воды пойм необходимо применять методику, предложенную Б.В. Поляковым, основанную на делении поймы на отсеки с резко отличной шероховатостью;

– самостоятельной проблемой является разработка методики расчётов ширины участка поймы, находящегося под активным воздействием руслового потока;

– необходима разработка методики измерения уклонов водной поверхности пойменных потоков при различных типах пойм.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Гидравлические сопротивления речных русел. – СПб.: изд. РГГМУ, 2003. – 147 с.
2. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.
3. *Барышников Н.Б.* Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.
4. *Барышников Н.Б., Пагин А.О., Польцина Е.В., Селина Т.С.* Учёт кинематического эффекта в методах расчёта пропускной способности пойменных русел // *Метеорология и гидрология*, 2008, № 10, с. 80–85.
5. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
6. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
7. *Карасёв И.Ф.* Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
8. *Поляков Б.В.* Гидрологический анализ и расчёты. – Л.: Гидрометеиздат, 1946. – 480 с.
9. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. – М.: Транспорт, 1972. – 280 с.