

Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина, Е.М. Скоморохова, Е.А. Поташко

КОЭФФИЦИЕНТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОЙМ

N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina, E.M. Skomorokhova, E.A. Potashko

ROUGHNESS COEFFICIENTS OF FLOODPLAINS

Выполнен анализ современного состояния методов расчётов пропускной способности русел с поймами на основе данных о максимальных уровнях воды и морфометрических характеристиках русел и пойм, и их коэффициентах шероховатости. Вскрыты основные недостатки этих методов, в частности, не учёт влияния эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков на гидравлические сопротивления, характеризующиеся коэффициентами шероховатости.

Ключевые слова: русло, пойма, коэффициент шероховатости, эффект взаимодействия потоков, гидравлическое сопротивление.

Up-to-day methods of computation of discharge capacity for riverbeds with floodplains that take into account maximum water stage, morphometric characteristics of riverbeds and floodplains, and their roughness coefficients are analyzed in this paper. Main disadvantages of those methods are revealed (in particular, influence of riverbed and floodplain streams interaction on hydraulic resistance which is characterized by roughness coefficients).

Key words: riverbed, floodplain, roughness coefficient, effect of streams interaction, hydraulic resistance.

Коэффициенты шероховатости являются интегральной характеристикой гидравлических сопротивлений движению потоков. Их появление обусловлено работами А. Шези, предложившего формулу для расчётов средних скоростей русловых потоков в виде $v = 50\sqrt{hI}$. Впоследствии было установлено, что вместо постоянной, равной 50, необходимо ввести переменный коэффициент, обозначенный С и названный в честь автора формулы коэффициентом Шези. Этот коэффициент определялся на основании описательной характеристики русел и пойм по специально составленным таблицам или, если имелись данные натурных наблюдений, по одной из многочисленных эмпирических формул. Их количество в последнее время превысило 200 [2,6 и др.]. Как таблицы, так и формулы для определения коэффициентов Шези нашли широкое применение для расчётов пропускной способности русел и пойм, и особенно, при максимальных уровнях [10]. В последнее время они часто используются для решения обратной задачи, т.е. для определения максимальных уровней по данным о максимальных расходах воды и морфометрических характеристиках русел и пойм. Основными недостатками этих методов являются:

- субъективизм при выборе расчётных значений коэффициентов шероховатости по соответствующим таблицам;
- допущение о равномерности движения воды в речных руслах и особенно пойменных потоках;

- несовершенство эмпирических формул для расчётов коэффициентов Шези на основании значений коэффициентов шероховатости.

Выполним краткий анализ этих недостатков. Первый недостаток обуславливает существенные погрешности расчётов, так как различные и особенно неопытные специалисты могут допустить большие погрешности при определении расчётных значений коэффициентов шероховатости. Для уменьшения величины этой погрешности В.Т. Чоу [13] составил альбом цветных фотографий в виде приложения к своей таблице. Однако, несмотря на это, в каждой графе его таблицы приводится диапазон значений коэффициентов шероховатости. При этом крайние значения отличаются друг от друга почти в два раза. Второй недостаток особенно остро ощущается при расчётах пропускной способности пойм, движение потоков по которым неравномерное, неустановившееся и, более того, с переменным по длине расходом воды. Третий недостаток, обусловленный несовершенством расчётных эмпирических формул, да и таблиц для определения коэффициентов шероховатости. Действительно, оценке качества этих формул препятствует отсутствие критериев сравнения полученных результатов. Более того, как показал анализ, в, наиболее часто применяемой для расчётов, формуле Павловского в виде $C = h^y/n$ получается, что коэффициент шероховатости имеет не постоянную, а переменную размерность, так как $y = f(n)$ и изменяется примерно от 1/4 до 1/8.

Контрольные расчёты максимальных расходов воды, проведённые на кафедре гидрометрии на основе натурных данных даже для беспойменных русел, показали, что погрешности расчётов при использовании наиболее распространённых таблиц для определения коэффициентов шероховатости И.Ф. Карасёва[9], М.Ф. Срибного [12], В.Т. Чоу [13], Дж. Бредли в среднем составляют погрешность 30-35% при её максимальном значении превышающем 100% [1,4], т.е. значительно превышают допустимые пределы. При расчётах же пропускной способности пойм эти погрешности значительно возрастают.

В последние годы на кафедре гидрометрии выполнена большая работа, направленная на совершенствование методов расчётов пропускной способности русел [3,4] и особенно пойм. При этом были вскрыты основные причины недостатков методов, основанных на формуле Шези [3]. Основным из них является недоучёт особенностей движения пойменных потоков, значительно отличающихся от условий равномерного движения и, в частности, недоучёт влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Действительно, коэффициент шероховатости зависит от нескольких параметров речных русел и пойм, таких как высота выступов шероховатости, донных гряд, извилистости речных русел, растительности, водоворотных зон и др. и в общем виде может быть представлена в виде:

$$n=f(k,r,l,m,t,...), \quad (1)$$

где k — крупность донных отложений; r — коэффициент, учитывающий форму сечения; l — параметр, учитывающий влияние донных гряд; m —учёт эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков; t —учёт режима перемещения наносов.

Одну из первых попыток получить выражение (1) в явном виде предпринял Кован, предложивший выражение:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m, \quad (2)$$

где n_0 - основное значение n для прямолинейного однородного канала с гладкими стенками (0,020—0,025); n_1, n_2, n_3, n_4, m - параметры, учитывающие дополнительные факторы: неоднородность поверхности, влияние неравномерности движения, местные сопротивления, растительность и характер режима движения, а также извилистость русла. Ориентировочные значения этих коэффициентов приведены в таблице 1, заимствованной у В.Т. Чоу. Этот метод не учитывает сопротивления, возникающего за счет перемещения наносов, как взвешенных, так и донных.

Таблица 1

Данные для вычисления коэффициента шероховатости по формуле (2)

Фактор, влияющий на коэффициент шероховатости	Характеристика фактора	Коэффициент	Значение коэффициента
Материал, из которого сложено русло	Земля	n_0	0,02
	Рваный камень		0,025
	Окатанный гравий		0,024
	Неокатанный гравий		0,028
Степень неоднородности поверхности	Пренебрежимая (гладкая) поверхность	n_1	0
	Незначительная		0,005
	Средняя		0,01
	Значительная		0,02
Изменение поперечного сечения канала	Постепенное	n_2	0,00
	Случайное		0,005
	Множественное		0,01-0,015
Воздействие препятствия	Пренебрежимое	n_3	0,00
	Незначительное		0,01-0,015
	Ощутимое		0,02-0,03
	Значительное		0,04-0,06
Растительность	Низкая	n_4	0,005-0,01
	Средняя		0,01-0,025
	Высокая		0,025-0,05
	Очень высокая		0,05-0,1
Степень меандрирования	Незначительная	m	1,00
	Ощутимая		1,15
	Значительная		1,30

Методика Кована в модифицированном виде применяется для определения коэффициента шероховатости в Индии. Представляет интерес предложенная в этой же работе, методика расчета коэффициента шероховатости по данным измерений расходов воды в двух соседних створах по формуле

$$n_n = \frac{2\bar{\omega}R^{2/3} \left\{ \frac{1}{l} \left[\Delta h - \frac{\bar{Q}^2}{2g} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \right] \right\}^{1/2}}{Q_1 + Q_2} \approx \frac{2\bar{R}^{2/3} \left\{ \frac{1}{l} \left(\Delta h - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \right\}^{1/2}}{v_1 + v_2},$$

где l — расстояние; Δh — падение уровня между створами; индексы 1 и 2 и знак осреднения обозначают, что параметры относятся соответственно к первому, второму створам или являются осредненными между ними.

Эти выражения получены на основе уравнений неравномерного движения и формулы Маннинга. Обозначая падение между створами за счет неравномерности движения потока через $\Delta h_n = (v_2^2 - v_1^2)/2g$, получаем

$$n_n = \frac{2\bar{R}^{2/3} (I - I_n^2)}{v_1 - v_2} \approx \frac{\bar{R}^{2/3} (I - I_n)^{1/2}}{v} \approx n - n_{пр}.$$

Следовательно, в данных формулах при расчетах коэффициентов шероховатости учтены дополнительные сопротивления за счет неравномерности режима движения потока ($n_{пр}$).

Таким образом, анализ опубликованных работ позволяет сделать вывод, что параметр n является некоторой интегральной характеристикой, зависящей от целого ряда факторов, учитывающей все многообразие проявления сопротивлений движению потоков в руслах. Наиболее сложным является определение значения n в руслах с поймами. Это обусловлено тем, что, помимо составляющих, перечисленных в формуле необходимо учитывать характер перемещения донных наносов (грядовая или безгрядовая фаза), транспорт взвешенных наносов, косоструйность течения в створе измерения, взаимодействие руслового и пойменного потоков и ряд других факторов. Особенно велико значение косоструйности течения при затоплении и разгрузке пойм в период работы прорыв, а также при взаимодействии руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под большими углами ($\alpha > 60^\circ$). Так, эксперименты, выполненные в РГГМУ, а также в Институте водных проблем (в Белоруссии) и ГГИ на р. Сож, показали, что в русле реки при затопленной пойме могут наблюдаться обратные течения и мощные водоворотные зоны, резко увеличивающие значения параметра n . Г. В. Иванов [8] рекомендовал выполнять расчет планов течений для пойменных участков рек на основе карты распределения параметра n , принимая значение последнего переменным.

Таким образом, наиболее целесообразным на данном этапе является дальнейшее уточнение и разработка направления, предложенного Кованом. Следует отметить, что введение m в формулу (2) в виде сомножителя нецелесообразно.

Более приемлемой является следующая форма записи:

$$n = n_0 + \sum_{i=1}^{i=m} \Delta n_i, \quad (3)$$

где

$$\sum_{i=1}^{i=m} \Delta n_i = \Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \dots + \Delta n_m, \quad (4)$$

Δn_i – добавочные значения коэффициентов шероховатости, учитывающие увеличение сопротивлений, возникающих в естественных потоках и каналах по сравнению с каналами в хороших условиях;

Δn_1 – учитывает увеличение сопротивления естественных русел по сравнению с каналами (в хороших условиях);

$\Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4, \Delta n_5, \Delta n_6, \Delta n_7$ – учитывают соответственно неравномерность движения, неустановившийся режим, растительность (на берегах и в русле), искривление руслового потока, взаимодействие руслового и пойменного потоков, наличие водоворотных зон.

Список значений Δn_i можно продолжить, учитывая, таким образом, различные особенности сопротивления движению потока в естественных условиях.

Наибольшая трудность состоит в невозможности непосредственного измерения значений Δn_i в натуральных условиях. Однако использование опубликованных данных, в частности табличных значений параметра n , позволяет ориентировочно подсчитать некоторые значения Δn_i .

Для определения значений параметров Δn_i в выражении (4) был выполнен анализ значений n , приведенных в таблицах М. Ф. Срибного [12], И.Ф. Карасев [9], Дж. Бредли и В. Т. Чоу [13], а также данных измерений примерно 600 расходов воды (около 200 измерено на пойме) на 27 реках, расположенных в различных районах бывшего СССР. Следует отметить, что для расчетов отбирались только те расходы, при измерениях которых определялись уклоны свободной поверхности или имелась возможность расчета последних по кривой $I = f(H)$.

В таблице 1, приведенной в работе [1], принято, что $n_0 = 0,030 \div 0,035$, т. е. для малых рек в условиях хорошего протекания потока. Поэтому для крупных рек в ряде случаев получены отрицательные значения Δn_i . Анализ этих данных позволяет сделать вывод о довольно близком соответствии параметров n_0 и Δn_i по данным четырех авторов. Однако наблюдаются и отдельные существенные расхождения, вызванные как неточностью формулировок, так и некоторым отличием результатов, полученных при обработке исходных материалов. Эти различия возрастают при больших значениях n . Например, рассматривая Δn_i для пойм, заросших легким кустарником (летом), имеем, по Бредли, $\Delta n = 0,070 \div 0,125$, по Срибному, $\Delta n = 0,050$ и, по Чоу, $\Delta n = 0,015 \div 0,045$. Если крайнее значение Δn , по Чоу, близко к данным Срибного, то значение Δn , по Бредли, в 1,5 - 2,5 раза больше. Это показывает, что расчетное значение расхода воды на пойме в указанных условиях, по Бредли, будет в 1,23 - 1,6 раза меньше, чем по Срибному, и почти в 2 раза меньше, чем по Чоу.

Особенно велики погрешности расчётов коэффициентов Шези на прирусловых участках пойм, из-за влияния эффекта взаимодействия потоков. При этом значитель-

ное влияние оказывает фаза прохождения паводка или половодья. Действительно, при подъёме и затоплении пойм верхние слои руслового потока, поступая на пойму, испытывают наибольшее сопротивление движению и особенно за счёт прирусловых валов, как правило, заросших растительностью. В качестве примера можно привести р. Лугу пос. Толмачёво, где процесс взаимодействия потоков осуществляется по третьему их типу (рисунок 1) по типизации Н.Б. Барышникова [2,4]

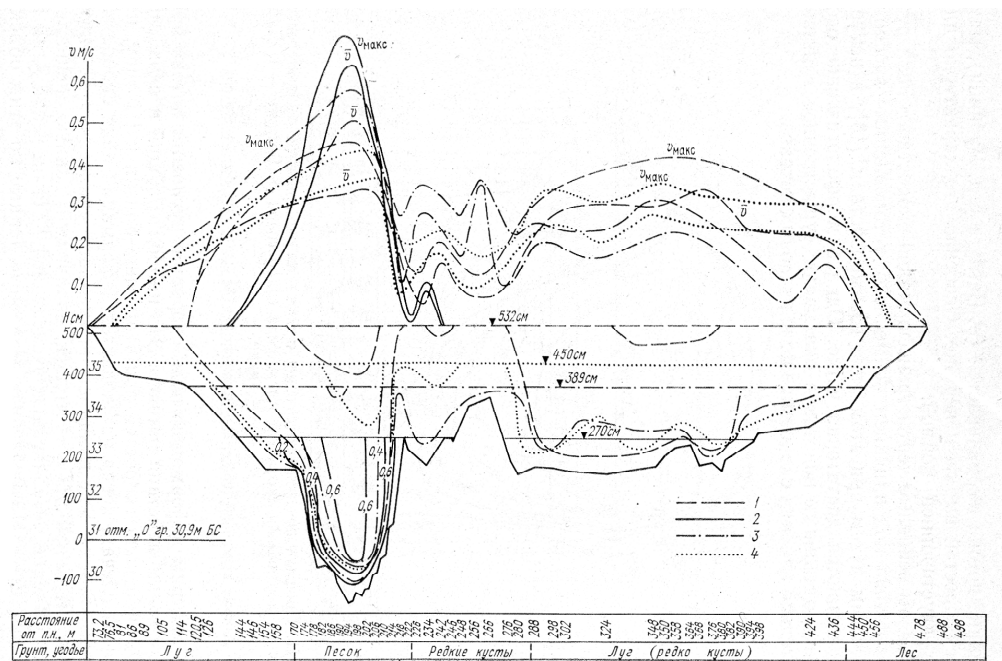


Рис.1 — Профиль поперечного сечения с изотохами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.Луги - пос. Толмачёво.
Данные измерений 1977 г. при уровнях; 1 - 532 см, 2 - 450 см, 3 - 389 см, 4 — 270 см.

Как видно на рисунке, при максимальных уровнях наблюдается два чётко выраженных потока русловой и пойменный. При этом их средние скорости близки между собой. Эти потоки как бы разделены потоком над прирусловым валом, сопротивление движению которому определяется характером строения и растительностью на нём. В связи с этим встаёт вопрос о размерах зоны влияния руслового потока на гидравлику пойменного потока. Так ряд исследователей Г.В. Железняков [7], Н.Б. Барышников [2,4] и другие на основе анализа данных лабораторных экспериментов считают, что величина этого влияния составляет 5-6 ширин руслового потока. Однако в этих экспериментах, как правило, поверхность поймы была выполнена из железобетонного, т.е. была гладкой. В тоже время анализ натурных данных, выполненный Барышниковым, показал, что на натурных потоках зона воздействия руслового потока на пойменный зависит от шероховатости поверхности поймы и существенно сокращается до величин 1,5-3,0 ширин руслового потока [2,3].

Следует отметить и исследования В.Н. Гончарова, выполненные в РГГМУ [5] на модели криволинейного русла постоянной ширины с гладкой двусторонней поймой переменной ширины. Он, в частности, установил, что при глубинах пойменного потока меньших 0,2 глубин руслового потока, ведущим является русловой поток. При глубинах пойменного потока больших 0,2 глубин руслового потока ведущим становится пойменный поток.

Анализ результатов экспериментов последних лет, проведённых в лаборатории РГГМУ на модели русла с односторонней шероховатой поймой, при высоте выступов шероховатости на ней в 2-2,5 см, показал, что при глубинах пойменного потока 2-3 см, т.е. 0,3-0,4 глубины руслового потока, ведущим сохраняется русловой поток. Более того, несмотря на то, что эксперименты выполнялись при расходящихся или сходящихся динамических осях взаимодействующих потоков под углами 5, 10, 15 и 20°, на границе их раздела возникали вихри с вертикальной осью вращения, т.е. процесс взаимодействия потоков был близок к условиям первого их типа по типизации Н.Б. Барышникова [2,3].

Анализ полей скоростей взаимодействующих потоков при расходящихся динамических осях показал, что при поступлении поверхностных слоёв водных масс русловых потоков на пойму наблюдается резкое уменьшение значений их коэффициентов шероховатости в прирусловых отсеках пойм до 0,012-0,014, что значительно, примерно в 2 раза, меньше аналогичных, приведённых в таблицах для определения коэффициентов шероховатости. Причиной таких низких значений коэффициентов шероховатости являются допущения в обосновании возможности применения формул и методов расчётов параметров потоков равномерного движения к потокам в руслах с поймами, где движение неравномерное с переменным по длине расходом воды. По данным Д.Е. Скородумова [11] и Н. Б. Барышникова [2,4] погрешности расчётов средних скоростей за счёт недоучёта неравномерности движения и массообмена между русловыми и пойменными потоками могут соответственно достигать 80-100% и 20-25%.

Несколько отличные условия наблюдаются при спаде уровней, когда массы пойменного потока поступают в русловой, тормозя его и создавая подпор русловому потоку. По-видимому, именно этим частично объясняются и причины образования петель на кривых зависимостей скоростей и расходов воды от уровней при уровнях превышающих уровни затопления пойм.

Таким образом, сделаны первые шаги по совершенствованию методов расчётов максимальных расходов воды и их составляющих таблиц для определения коэффициентов шероховатости. Тем более, что в условиях нестационарности природных процессов, злободневным является необходимость совершенствования методов расчётов максимальных расходов воды.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Речные поймы (морфология и гидравлика) [Текст]/ Н.Б. Барышников – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 152 с.
2. *Барышников Н.Б.* Морфология, гидрология и гидравлика пойм [Текст] / Н.Б. Барышников – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.
3. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков [Текст] / Н.Б. Барышников – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.

4. *Барышников Н.Б., Пагин А.О., Польцина Е. В., Селина Т.С.* Учёт кинематического эффекта в методах расчёта пропускной способности пойменных русел [Текст] — М.: журнал Метеорология и гидрология, 2008, №10. — С.80-85
5. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков [Текст]/ В.Н. Гончаров — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 374 с.
6. *Горбачёв П.Ф.* Формулы средней скорости [Текст]/ — М., Л.:ОНТИ, 1936. — 171с.
7. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек [Текст]/ В.Н. Гончаров — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 311 с.
8. *Иванов Г.В., Субботина Е.С.* Применение методов расчётов решения плановых задач к расчёту максимальных расходов воды [Текст] / В книге Тезисы докладов 1-ой приморской конференции по гидрологическим расчётам. — Владивосток, 1975. — С.75-79
9. *Карасёв И.Ф.* Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов [Текст]/ — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 310с.
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 [Текст] / Д.Е. Скородумов // Тр. ГГИ, 1965, вып.128. — С.3-97.
12. *Срибный М.Ф.* нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчёт отверстий больших мостов [Текст] — М., Л.: Госстройиздат, 1965. — 148с.
13. *Чоу В.Т.* Гидравлика открытых каналов — М.: Стройиздат, 1969. — 464с.