

*Н.Б. Барышников, П.П. Овсейко, Е.С. Субботина, И.С. Терентьев*

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОТОКОВ В РУСЛАХ С ПОЙМАМИ

*N.B. Baryshnikov, P.P. Ovseyko, E.S. Subbotina, I.S. Terentyev*

## HYDRAULIC RESISTANCES TO FLOW MOTION IN FLOODPLAIN RIVER CHANNELS

*Выполнен анализ методов расчётов коэффициентов шероховатости, основанных на морфометрических характеристиках русла и сведениях об уровнях воды. Приведены результаты оценки эффективности таблиц для определения коэффициентов шероховатости и воздействия эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков на коэффициенты шероховатости и пропускную способность русел с поймами. Установлена недостаточная оценка влияния глубин в формулах для расчётов коэффициентов Шези и шероховатости.*

*Ключевые слова: коэффициенты Шези, шероховатость, глубина, эффект взаимодействия русловых и пойменных потоков.*

*Methods of roughness coefficients calculation, based on taking into account the river channel morphometric parameters, and water level data, are analyzed in this paper. Results of assessment of efficiency of tables used for the roughness coefficients determination, and impact of the riverbed and floodplain streams interaction on those coefficients and the floodplain channels discharge capacity, are presented. Underestimation of the depth impact in formulas for calculating Chezy and roughness coefficients is found.*

*Key words: Chezy coefficients, roughness coefficients, depth, effect of the riverbed and floodplain streams interaction.*

При расчётах максимальных, и особенно катастрофических расходов воды на основе сведений о максимальных уровнях воды и морфометрических характеристиках расчётного участка основной сложностью является определение коэффициентов шероховатости русел и пойм, которые нормативные документы рекомендуют определять по описательным характеристикам расчётных участков рек и соответствующим таблицам. В России наиболее распространёнными из них являются таблицы М.Ф. Срибного и И.Ф. Карасёва, а за рубежом — В.Т. Чоу и Дж. Бредли. Однако, как показал анализ результатов контрольных расчётов на основе данных измерений более чем 500 максимальных расходов воды на беспойменных створах рек России, средние погрешности расчётов составили 32–35 % [1, 5], незначительно изменяясь в зависимости от используемой таблицы для определения значений коэффициентов шероховатости. Наибольшие же погрешности расчётов существенно превысили 100 %.

В то же время следует учитывать, что большинство рек России — равнинные и максимальные расходы воды на них, как правило, проходят при затопленной пойме. При этом необходимым является учёт воздействия эффекта взаимодействия русловых

и пойменных потоков существенно трансформирующего эпюру распределения скоростей и изменяющего средние скорости как русловых, так и пойменных потоков, а следовательно, и пропускную способность русел и пойм [2, 4].

Величина такого изменения находится в прямой зависимости от глубин затопления русел и пойм, типа взаимодействия руслового и пойменного потоков и угла между их динамическими осями [4]. Последние определяются по крупномасштабным планово-высотным картографическим материалам.

При расширении участка затопленной части поймы ниже расчётного створа происходит увеличение уклонов водной поверхности руслового потока и, как следствие, его скорости и пропускной способности русла. При сужении участка поймы наблюдается противоположный процесс, т.е. пойменные воды, вторгаясь в русловую поток, создают подпор и, как следствие, уменьшают скорости руслового потока и пропускную способность русла. Всё это свидетельствует о том, что потоки в таких руслах являются неравномерными, более того, с переменными по длине расходами воды. Поэтому применение к расчёту пропускной способности таких русел методики, основанной на допущении о равномерном движении, т.е. на основе формулы Шези, приводит к большим погрешностям расчётов, превышающим допустимые пределы.

Действительно, попытки расчётов коэффициентов шероховатости на основе натурных данных и формул Шези–Маннинга или Шези–Павловского показали, что их значения, особенно для пойм, существенно отличаются от приведённых в таблицах. Так для ряда рек Белоруссии и Дальнего Востока минимальные расчётные значения коэффициентов шероховатости пойм составляли 0,012–0,014, хотя соответствующие минимальные значения таких коэффициентов, определяемые по таблицам, составляли 0,025–0,030, т.е. были примерно в два раза больше [2, 4]. Существенно отклоняются данные, полученные по результатам натурных измерений, от табличных и для русел при взаимодействии потоков в них с пойменными. Объяснением этому является тот факт, что движение руслопойменных потоков нельзя принимать равномерным, т.е. расчёт коэффициентов шероховатости по натурным данным нельзя осуществлять на основе формул Шези–Маннинга или Шези–Павловского или по любой аналогичной формуле.

Действительно, в периоды подъёма уровней из русел на поймы поступают поверхностные массы воды русловых потоков со скоростями, значительно превышающими аналогичные, но при изоляции пойменных потоков, т.е. при их равномерном движении. Как указывалось выше, такой процесс приводит к значительному, в два и более раз изменению значений коэффициентов шероховатости прирусловых участков пойм при их расчётах на основе формул для потоков равномерного движения. Следовательно, целесообразно ввести в нормативные таблицы параметры, учитывающие воздействие эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков. Однако прежде чем представится возможность это сделать, необходимо на основе анализа натурных данных уточнить ширину зоны ускоряющего воздействия руслового потока на пойменный. Её ширина, по-видимому, зависит от разности скоростей взаимодействующих потоков, угла  $\alpha$  под которым воды руслового потока поступают на пойму или из поймы в русло, размеров, и особенно, высоты прирусловых валов, а также степени их зарастания растительностью.

Именно прирусловые валы определяют эффективность ускоряющего воздействия русловых потоков на пойменные. Для оценки зависимости ширины зоны от

определяющих факторов необходимо иметь банк натурных данных, включающий в себя как результаты крупномасштабных планово-высотных съёмок, аэрофотосъёмок и космических снимков, так и сведения о гидравлике руслопойменных потоков. В качестве примера можно привести информацию по двум участкам р. Луги у д. Воронино (рис. 1) и посёлка Толмачёво (рис. 2). Как видно на рис. 1 и 2, у д. Воронино поток поймы имеет незначительную глубину и существенного влияния на русловой не оказывает. У посёлка же Толмачёво прирусловой вал имеет весьма значительные размеры, вполне соизмеримые с размерами основного русла (до выхода воды на пойму). Поэтому этот вал, к тому же интенсивно заросший растительностью, оказывает весьма значительное воздействие на эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, но только при больших глубинах руслового потока. На рис. 2, наблюдаются два слабо зависящих друг от друга потока: русловой и пойменный. Более того, скорости последнего по величине почти не отличаются от скоростей руслового потока.

Помимо прирусловых валов на ширину зоны пойменного потока, находящегося под воздействием руслового потока, значительное воздействие оказывает шероховатость поймы. Так, по данным Г.В. Железнякова [6], ширина зоны воздействия руслового потока на пойменный составляет 5–6 ширин руслового потока. Данная величина установлена на основе анализа экспериментальных данных, полученных на модели русла с «гладкой» поймой. В то же время, по данным Н.Б. Барышникова [2, 5], ширина зоны, определённая на основе натурных данных, составляет только 1–4 ширины русла. При этом наблюдается довольно чёткая обратная зависимость ширины участка поймы от степени её зарастания растительностью. Действительно, на пойме заросшей лесом, ширина участка поймы, находящегося под воздействием руслового потока, близка к единице, а при пойме заросшей травой она достигает четырёх ширин русла [4].

Изложенное выше подтверждает несовершенство методики, основанной на определении коэффициентов шероховатости по соответствующим таблицам, и требует её существенной доработки.

Учитывая, что роль рассматриваемой методики, позволяющей рассчитывать не только пропускную способность речных русел при наивысших уровнях, но и определять параметры кривых расходов воды, существенно возросла, целесообразно её совершенствование. Увеличение значения этой методики вызвано сложностями применения методов расчётов максимальных и других расходов воды на основе статистических методов из-за нестационарности природных процессов в последний 20–30-летний период, обусловленный потеплением климата.

Рассмотрим возможные пути совершенствования методики, предварительно выполнив анализ составляющих параметров, определяющих расчётное значение коэффициента шероховатости. В первом приближении для условий равномерного движения его можно представить в виде:

$$n = f(n_{\text{ш}}, n_{\text{г}}, n_{\text{ф}}, n_{\text{д}}), \quad (1)$$

где индексы ш — шероховатость дна; г — гряд; ф — формы сечения; д — дополнительных сопротивлений.

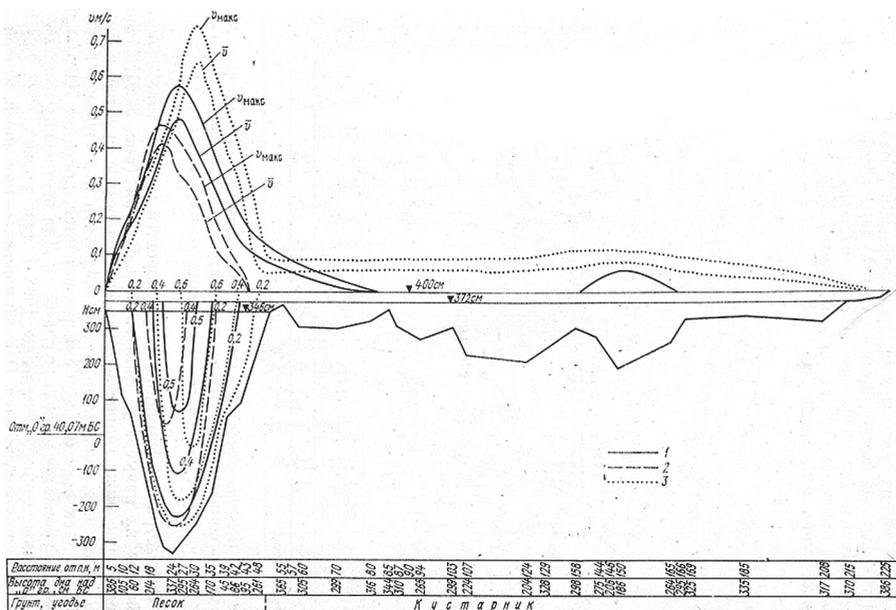


Рис. 1. Профиль поперечного сечения с изотомами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги — д. Воронино. Данные измерений 1966 г. при уровнях (см): 1 — 372; 2 — 346; 3 — 400

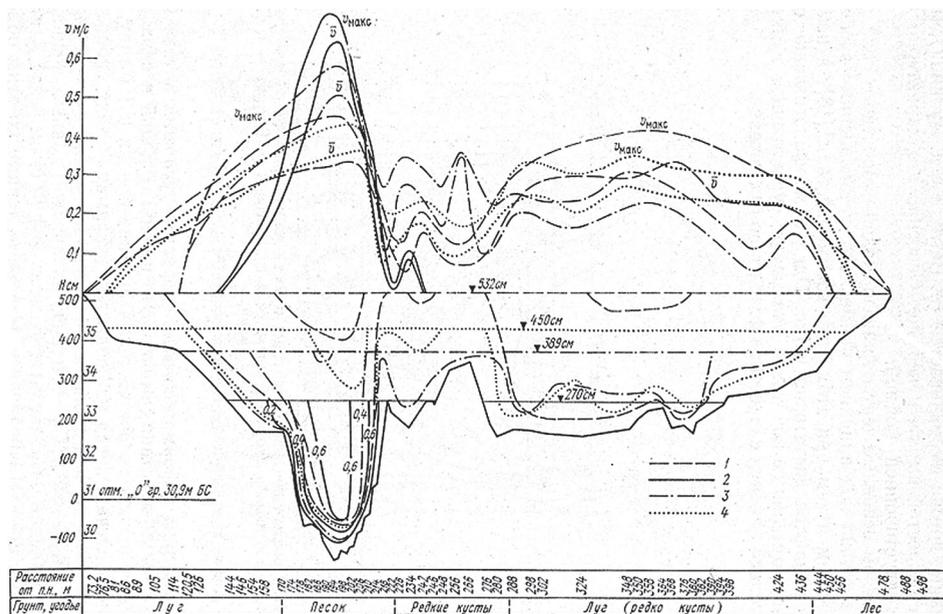


Рис. 2. Профиль поперечного сечения с изотомами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги — пос. Толмачево. Данные измерений 1977 г. при уровнях (см): 1 — 532; 2 — 450; 3 — 389; 4 — 270

Для условий движения потоков в речных руслах сложных форм сечения необходимо в выражение (1) добавить параметры, учитывающие нестационарность движения  $n_{нс}$ ;  $n_{нр}$  — неравномерность движения и  $n_{мо}$  — массообмен между русловым и пойменным потоками, тогда получим следующую зависимость:

$$n = f(n_{ш}, n_{г}, n_{ф}, n_{д}, n_{нс}, n_{нр}, n_{мо}). \quad (2)$$

Использовать эту зависимость в явном виде не представляется возможным, но хотя бы качественно оценить долю её составляющих вполне возможно. Так, исследования Н.Б. Барышникова [2, 5 и др], Д.Е. Скородумова [7] и других авторов показали, что для потоков в руслах с поймами, находящихся в естественном состоянии, членом, учитывающим нестационарность процесса ( $n_{нс}$ ), можно пренебречь, так как его величина составляет доли процента от общего сопротивления [4]. В то же время составляющие  $n_{нр}$  и  $n_{мо}$  являются значимыми, достигая соответственно 80 % и 25 % от суммарной величины сопротивлений. Поэтому их учёт при определении расчётного значения коэффициента шероховатости является обязательным. Как уже указывалось, для беспойменных русел средняя погрешность расчётов составляет 30–35 %, а для пойменных русел (особенно пойм) она значительно превышает приведённые значения, достигая 60–70 %, что неприемлемо для расчётов.

Как вытекает из анализа натурной информации по малым и средним рекам, расчётное значение коэффициента шероховатости в большей степени зависит от глубины потока, хотя это в таблицах для определения коэффициентов шероховатости не учитывается. Исключением является таблица, составленная Лиштваном, к сожалению, не опубликованная в открытой печати. Из её анализа вытекает, что глубины оказывают значительно большее влияние на коэффициенты Шези и шероховатости, чем это предусмотрено в большинстве формул для расчётов коэффициентов Шези по данным о коэффициентах шероховатости. Так, в формулах Маннинга и Павловского глубина входит в степени  $1/8$ – $1/4$  при среднем значении показателя степени  $1/5$ – $1/6$ , т.е. её влияние незначительно. Исходя из этого, на кафедре гидрометрии РГГМУ на основе информации более чем по 500 постам Росгидрометслужбы, расположенным на малых и средних как равнинных, так и горных реках бывшего Советского Союза были выполнены расчёты и установлены зависимости коэффициентов Шези и шероховатости от глубин в относительных координатах. Анализ кривых зависимостей вида  $n_p/n_{50} = f(h_p/h_{50})$  или  $C_p/C_{50} = f(h_p/h_{50})$  для беспойменных створов, где индекс 50 означает, что параметр является величиной обеспеченностью 50 %, позволил выделить пять их типов [2]. Прежде чем перейти к их анализу, отметим, что зависимости  $n_p/n_{50} = f(h_p/h_{50})$  являются зеркальным отображением зависимостей  $C_p/C_{50} = f(h_p/h_{50})$ . Поэтому с учётом этого положения ограничимся анализом только зависимостей  $n_p/n_{50} = f(h_p/h_{50})$ .

Первый тип — уменьшение значений коэффициентов шероховатости при увеличении глубин, обусловленное отсутствием растительности на берегах (рис. 3).

Второй тип — увеличение значений коэффициентов шероховатости с увеличением глубин, обусловленное интенсивным зарастанием берегов на равнинных реках или осыпями на горных реках (рис. 3).

Третий тип — сначала увеличение значений коэффициентов шероховатости до какого-то уровня воды, сменяемое их уменьшением, что также объясняется резким изменением зарастаемости берегов русла (рис. 4).

Четвёртый тип противоположен третьему, т.е. уменьшение значений коэффициентов шероховатости при достижении определённого уровня сменяется на их увеличение. Такой характер зависимости также обусловлен степенью зарастания берегов (рис. 4).

Пятый тип характеризуется практически независимостью коэффициентов шероховатости и Шези от глубин, что характерно для больших рек.

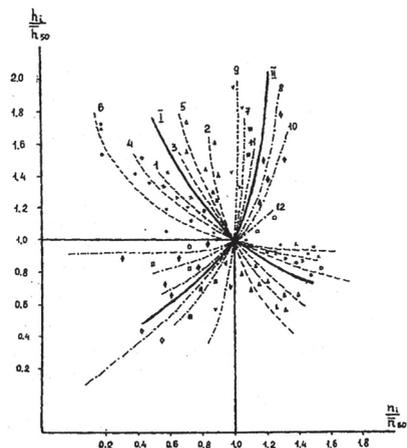


Рис. 3. График зависимости  $n_p/n_{50} = f(h/h_{50})$  для беспойменных створов равнинных рек.  
 I—II — кривые для первого и второго типов, осредненные для групп рек;  
 1—12 — кривые, полученные по данным наблюдений на конкретных реках

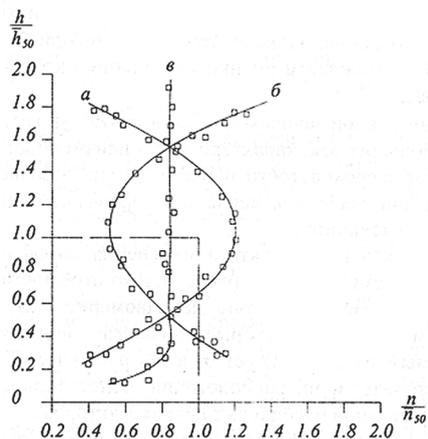


Рис. 4. График зависимости  $n_p/n_{50} = f(h_p/h_{50})$  (разные типы кривых):  
 а — третий тип; б — четвертый тип;  
 в — пятый тип

Дальнейший анализ информации о коэффициентах шероховатости русел с поймами позволил установить графическую зависимость вида  $n_p/n_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ , приведённую на рис. 5. Здесь  $h$  — средняя глубина русла;  $\alpha$  — угол между динамическими осями русловых и пойменных потоков; индексы  $p$  и  $p,б$  означают, что параметры относятся к русловым частям потока при уровнях, превышающих уровни затопления бровок прирусловых валов ( $p,б$ ), т.е. при уровнях, когда необходимо учитывать эффект взаимодействия русловых и пойменных потоков.

В полученной графической зависимости расчётная величина коэффициента шероховатости определяется только глубиной руслового потока и величиной угла  $\alpha$ . Данная зависимость недостаточно надёжная, значение среднеквадратичной погрешности для неё составляет величину 55 %. Однако она является наглядным подтверждением влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на расчётную величину коэффициентов шероховатости пойменных русел. В то же время существенное влияние на величину коэффициента шероховатости оказывает и ширина поймы.

Однако попытки оценить величину её влияния на коэффициент шероховатости не привели к успеху [5]. Зависимости вида  $n = f(B)$ , хотя и прослеживаются, но являются неустойчивыми. Поэтому на данном этапе исследований их нельзя рекомендовать в качестве расчётных.

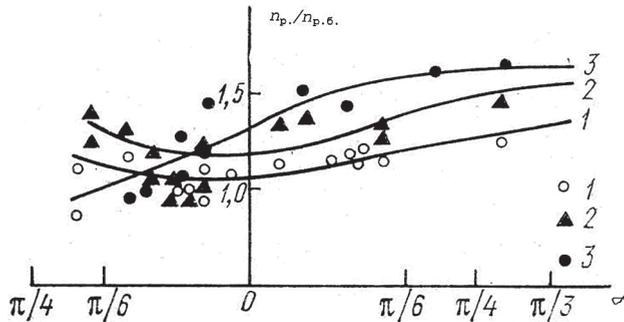


Рис. 5. Кривые  $n_p/n_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$ :  
 1 —  $h_p/h_{p,б} = 1,10$ ; 2 —  $h_p/h_{p,б} = 1,25$ ; 3 —  $h_p/h_{p,б} = 1,50$

Помимо приведённых выше факторов — глубин руслового потока и углов  $\alpha$ , на величину коэффициента шероховатости существенное влияние оказывают русловые образования (перекаты, побочни, острова, осерёдки и др.) Попытки оценить их воздействие на коэффициенты шероховатости производились неоднократно, в частности, И.А. Левашовой [4], которая оценивала их воздействие в зависимости от положения этих образований относительно расчётного створа. К сожалению, это направление ещё находится в стадии разработки.

Проведённый анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы и предложения:

- многочисленные формулы для расчётов коэффициентов Шези с помощью коэффициентов шероховатости не учитывают воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков и недоучитывает влияние глубин на гидравлические сопротивления речных русел и пойм;
- для потоков в руслах с поймами расчёты по методикам, основанным на теории равномерного движения, приводят к большим погрешностям расчётов, превышающим допустимые пределы, поэтому необходимо переходить к расчётам на основе уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды;
- необходимо усовершенствовать методику расчётов, основанную на учёте воздействия русловых образований на коэффициенты шероховатости речных русел.

### Литература

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. — Л.: Гидрометеоздат, 1978.  
 Baryshnikov N.B. Rechnyye poymy. — L.: Gidrometeoizdat, 1978.
2. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. — СПб.: РГГМУ, 2003.  
 Baryshnikov N.B. Gidravlicheskiye soprotivleniya rechnykh rusel. — SPb.: RGGMU, 2003.

3. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. — СПб.: РГГМУ, 2007.  
*Varyshnikov N.B.* Dinamika ruslovykh potokov. — SPb.: RGGMU, 2007.
4. *Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: РГГМУ, 2012.  
*Varyshnikov N.B.* Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki пойм. — SPb.: RGGMU, 2012.
5. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Скоморохова Е.М., Поташко Е.А.* Коэффициенты шероховатости пойм. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 23, с. 13–20.  
*Varyshnikov N.B., Subbotina Ye.S., Skomorokhova Ye.M., Potashko Ye.A.* Koeffitsiyenty sherokhovatosti пойм. // Uchenyye zapiski RGGMU, 2012, № 23, s. 13–20.
6. *Железнякав Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.  
*Zheleznyakov G.V.* Propusknaya sposobnost rusel kanalov i rek. — L.: Gidrometeoizdat, 1981.
7. *Скородумов Д.Е.* Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. // Труды ГГИ, 1965, вып. 128, с. 3–96.  
*Skorodumov D.E.* Voprosy gidravliki пойменных русел v svyazi s zadachami postroyeniya i ekstrapolyatsii kривых raskhodov vody. // Trudy GGI, 1965, vyp. 128, s. 3–96.