

Н.Б. Барышников, М.С. Дрегваль, П.П. Овсейко, Е.С. Субботина

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ
НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РУСЕЛ И ПОЙМ**

N.B. Baryshnikov, M.S. Dregval, P.P. Ovseyko, E.S. Subbotina

**IMPACT OF THE RIVERBED AND FLOODPLAIN
CURRENTS INTERACTION ONTO HYDRAULIC RESISTANCE
OF RIVERBEDS AND FLOODPLAINS**

Выполнен анализ методов расчёта пропускной способности русел с поймами при взаимодействии потоков в них. Выявлено влияние эффекта взаимодействия на гидравлику русловых и пойменных потоков и величины гидравлических сопротивлений русел и пойм. Рекомендовано применение для расчётов пропускной способности русел и пойм эмпирической методики, основанной на данных о максимальных уровнях воды и морфометрических характеристиках расчётного участка. Предложено модернизировать таблицу для определения коэффициентов шероховатости за счёт введения поправок, основанных на учете эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков.

Ключевые слова: русло, пойма, эффект взаимодействия потоков, гидравлические сопротивления, коэффициенты шероховатости, формула Шези.

The existing approaches of the river channels discharge capacity computation are considered for cases when riverbed and floodplain currents interact. Impact of the riverbed and floodplain currents interaction onto hydraulic resistance of riverbeds and floodplains is revealed. Using an empirical approach based on maximum water level and morphometric characteristics of the considered water course is recommended for computation of the riverbed and floodplain discharge capacity. Enhancing the table which is used for determination of the roughness coefficients based on taking into account the riverbed and floodplain currents interaction effect is proposed.

Key words: riverbed, floodplain, effect of currents interaction, hydraulic resistance, roughness coefficients, Chezy formula.

Гидравлические сопротивления являются одной из наиболее важных проблем гидравлики и особенно её речной составляющей [7,9]. Действительно, на их основе выполняются расчёты основных параметров русловых потоков, таких как средние скорости, пропускная способность русел и др. Однако, несмотря на более чем 200-летний период, проблема гидравлических сопротивлений речных русел и пойм далека от решения. Это, в первую очередь, обусловлено сложностью процессов формирующих эти сопротивления в речных руслах и поймах, множественностью факторов их определяющих и, как следствие, необходимостью применения для их расчётов статистических методов.

С целью упрощения задачи большинство расчётных методов, разработано для условий равномерного, точнее, квазиравномерного движения. Такой подход резко

упрощает задачу, позволяет с достаточной для практики точностью решать ряд практических задач, в частности, на основе формулы Шези, получая вполне удовлетворительные результаты. Они могут быть получены при расчётах пропускной способности речных русел, средних скоростей потоков в них и средних скоростей этих потоков на скоростных вертикалях, что имеет большое практическое значение, в частности, при расчётах глубин заложения мостовых опор [1, 4 и др.].

В то же время большинство рек РФ — равнинные и максимальные, особенно катастрофические, расходы на них проходят по затопленным поймам. При этом режим движения как русловых, так и пойменных потоков становится неравномерным и, более того, с переменным по длине расходом воды [2, 4]. Поэтому расчёты средних скоростей и других параметров как русловых, так и пойменных потоков на основе концепции равномерного движения, т.е. на основе формулы Шези, приводят к большим погрешностям, далеко выходящим за допустимые пределы [4, 5]. Причиной такого положения является возникающий при этом эффект взаимодействия потоков, приводящий, в зависимости от особенностей морфологического строения расчётного участка или фазы паводка и половодья либо к существенному увеличению скоростей русловых потоков по сравнению с условиями равномерного режима, либо к их значительному уменьшению [1, 4].

Влияние этого эффекта на гидравлику как русловых, так и пойменных потоков было вскрыто в середине прошлого столетия работами в основном отечественных учёных и в первую очередь исследованиями В.Н. Гончарова [6], Н.Б. Барышникова [1, 2], Г.В. Железнякова [7] и др. [1, 4, 6]. В частности, Барышниковым одним из первых разработана типизация процессов взаимодействия потоков, основанная на учёте особенностей морфологического строения участка русла и поймы, расположенного ниже расчётного створа [1, 2, 4]. Им, в частности, в зависимости от расположения динамических осей взаимодействующих потоков выделено пять их типов [1, 3, 5]. В связи со сложностью определения положения динамических осей потоков было принято решение приравнять их положение к положению геометрических осей русла и поймы на расчётном участке [5, 6].

Данная типизация помогла получить эмпирическую графическую зависимость вида $v_p/v_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ (рис. 1) для условий расходящихся и сходящихся динамических осей взаимодействующих потоков.

Здесь v и h — средние скорости и глубины русловых потоков; α — между динамическими осями взаимодействующих русловых и пойменных потоков; индексы «р» и «р.б.» означают, что расчётные параметры относятся к русловым потокам «р» при уровнях, превышающих уровни затопления бровок прирусловых и «р.б.» — при уровнях затопления бровок этих валов.

Эти зависимости позволяют рассчитывать средние скорости русловых потоков при их взаимодействии с потоками пойм. Значительно сложнее проблема получения расчётных зависимостей для гидравлических сопротивлений, в частности, характеризующихся коэффициентами шероховатости n . Зависимости вида $n_p/n_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ (рис. 2) имеют более сложный вид и являются менее надёжными, чем зависимости вида $v_p/v_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$. Это обусловлено физической неопределённостью коэффициента шероховатости, в частности, его размерности, и субъективностью его расчётов.

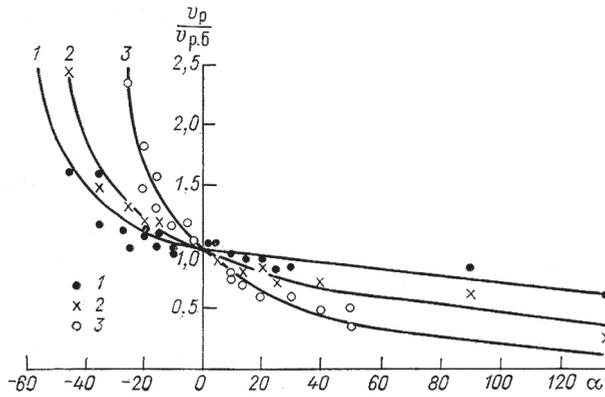


Рис. 1. Кривые $v_p/v_{p,6} = f(h_p/h_{p,6}, \alpha)$:
 1 — $h_p/h_{p,6} = 1,10$; 2 — $h_p/h_{p,6} = 1,25$; 3 — $h_p/h_{p,6} = 1,50$

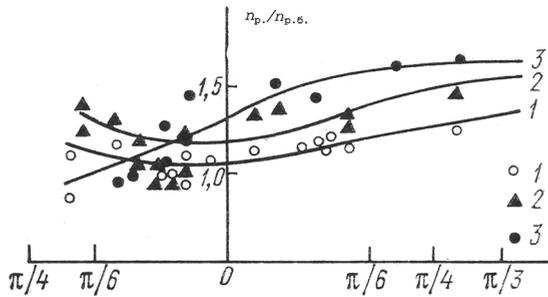


Рис. 2. Кривые $n_p/n_{p,6} = f(h_p/h_{p,6}, \alpha)$:
 1 — $h_p/h_{p,6} = 1,10$; 2 — $h_p/h_{p,6} = 1,25$; 3 — $h_p/h_{p,6} = 1,50$

Рассмотрим основную задачу данной работы, а именно оценку воздействия пойменного потока на русловой и руслового на пойменный. Как показал анализ результатов натурных исследований, выполненный Барышниковым и др. [1, 2, 4], на малых и средних реках при пропуске максимальных расходов воды редкой (1–2 %) обеспеченности, воздействие пойменного потока на русловой осуществляется на всей ширине руслового потока. Это воздействие, безусловно, зависит от мощности пойменного потока и, как правило, является тормозящим русловой поток. Рассмотрим результаты воздействия пойменного потока на поле скоростей руслового потока на примере двух средних рек ВВ УГМС при различных типах взаимодействия потоков (втором и третьем).

Как видно на рис. 3, где приведены кривые зависимостей средних на вертикалях скоростей от уровней воды, $v_B = f(H)$, на р. Пьяне у д. Камкино наблюдается резкое увеличение градиентов скоростей при увеличении уровней после выхода воды на пойму. Оно значительно увеличивается после затопления прирусловых валов, когда

формируется единый руслопойменный поток. Это свидетельствует о том, что при втором типе взаимодействия потоков, когда в них из бассейна поступает наибольшее количество воды, система поток – русло перестраивается таким образом, что, почти в два раза увеличивает пропускную способность русла. Противоположная картина наблюдается на р. Ветлуге у д. Быстри, где процесс взаимодействия потоков происходит по третьему типу, что соответствует периоду спада уровней. Как видно на рис. 3, после затопления поймы наблюдается стабилизация средних на вертикалях скоростей при увеличении уровней воды, затем после затопления прирусловых валов и образования единого руслопойменного потока происходит резкое, более чем в 2 раза, уменьшение этих скоростей (от 1,05 до 0,30 м/с). Этот пример также свидетельствует не только о тормозящем воздействии пойменного потока на всю ширину руслового, но и о присутствии принципа саморегулирования в системе речной поток – русло.

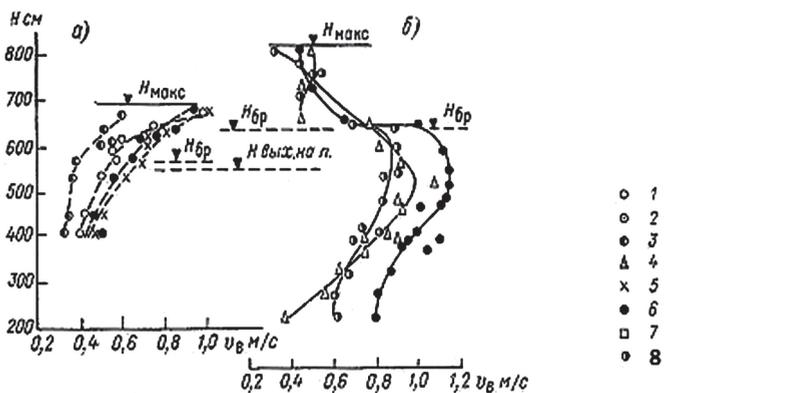


Рис. 3. Кривые $v_b = f(H)$:
 а — р. Пьяна—д. Камкино; б — р. Ветлуга—д. Быстри;
 1—8 — номера скоростных вертикалей; л.п. — левая пойма; п.п. — правая

На больших реках, таких как Обь, Енисей, Амур и другие тормозящее воздействие пойменного потока на русловую распространяется только на часть ширины руслового потока и, безусловно, также зависит от мощности пойменного потока, т.е. от его скорости, глубины и ширины. Наглядной иллюстрацией этого являются данные измерений параметров, в частности, скоростей и максимального расхода воды в русловой части потока р. Амур у пос. Кумара. Этот максимальный расход воды оценивается как расход 2 %-ной обеспеченности. Затопленная часть поймы была шириной примерно равной 0,4 ширины русла. Как видно на рис. 4, где приведены зависимости средних на вертикалях скоростей от уровней воды $v_b = f(h)$. Большинство из них имеют S-образную форму. Эти зависимости для скоростных вертикалей по мере удаления от поймы как бы распрямляются и на расстоянии от поймы, примерно равном 0,6 ширины руслового потока, преобразуются в параболические кривые. Это свидетельствует об уменьшении воздействия пойменного потока на русловую, вплоть до расстояния в 60 % ширины руслового потока.

Рассмотрим воздействие руслового потока на пойменный. Оно особенно велико в период подъёма уровней при затоплении поймы, когда поверхностные слои руслового потока, имеющие скорости значительно, иногда в два раза и более, превышающие скорости пойменного потока, поступают на пойму, коэффициенты шероховатости, определённые на основе формул равномерного движения, таких как Шези – Павловского, могут составлять для прирусловых отсеков поймы величины 0,012–0,016. Эти значения коэффициентов шероховатости в два и более раз меньше их значений для поймы, приведённых в таблицах для определения коэффициентов шероховатости И.Ф. Карасёва [8] или В.Т. Чоу [10]. Следовательно указанные таблицы, впрочем как и другие аналогичные им, должны быть откорректированы на основе учёта эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков.

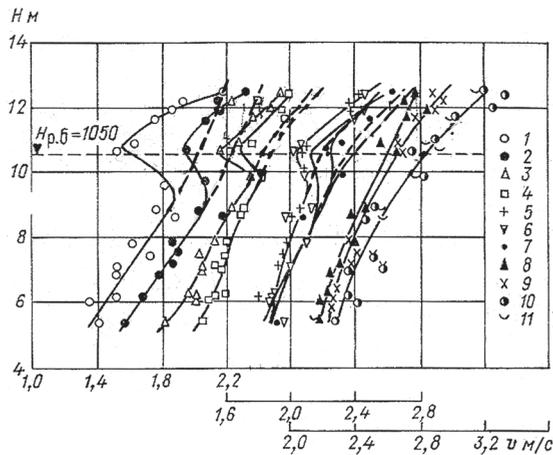


Рис. 4. Зависимости средних на вертикалях скоростей от уровня воды на р. Амур — пос. Кумара за 1958 г.: 1–11 — вертикали; «----» — результаты расчета по формуле Шези

Существенное влияние на гидравлику русловых и пойменных потоков оказывают прирусловые валы, отделяющие русловые потоки от пойменных и значительно уменьшающие воздействие эффекта взаимодействия потоков. Действительно, высота таких валов может достигать десятка и более метров. К тому же они довольно часто зарастают растительностью, в том числе деревьями, высотой иногда более десятка метров. В то же время отметки прирусловых валов могут значительно изменяться по длине. В ряде случаев на них образуются «прорвы», т.е. резкие понижения их отметок, вплоть до полного разрушения этих валов, в основном, из-за антропогенного воздействия.

К сожалению, воздействие прирусловых валов на гидравлику русловых и пойменных потоков изучено недостаточно. Исследования в этом направлении только начаты, в частности, в РГГМУ [2]. Сложность проблемы обусловлена не только необходимостью учёта множества определяющих факторов, но и отсутствием или сложностью получения натурной информации.

Важным также является оценка ширины зоны воздействия руслового потока на пойменные. По оценкам, основанным на данных лабораторных наблюдений, как правило, проведённых на установках, где пойма была гладкой, т.е. выполненная из железобетонного бетона, она составляет 5–6 ширин руслового потока [7]. Однако результаты анализа натуральных данных, полученных на реках, расположенных в различных регионах РФ, показывают, что ширина этой зоны значительно меньше и не превышает 4,0 ширин руслового потока. При этом наблюдается чёткая зависимость ширины этой зоны от степени зарастания поймы растительностью, особенно лесом. В последнем случае ширина зоны воздействия уменьшается до одной ширины руслового потока [1, 5].

Наводнения последних лет как на реках РФ, таких как Амур, Аргунь, Кубань и других, так и на зарубежных реках, свидетельствуют о необходимости совершенствования расчётных методов, в частности, методов расчётов максимальных расходов воды, особенно в условиях наметившейся нестационарности природных процессов, или разработки принципиально новых методов. Одним из них является разработанный на кафедре гидрометрии РГГМУ метод, основанный на сведениях о максимальных уровнях воды и морфометрических характеристиках русел и пойм на расчётном участке. Одной из таких характеристик и является приведённый выше угол α между динамическими осями взаимодействующих потоков.

Более сложной является проблема расчётов пойменной составляющей максимальных расходов воды. Это в первую очередь обусловлено сложностью морфологического строения пойм и пойменных массивов, значительно более низкой точностью, а иногда и полным отсутствием информации о пойменных составляющих максимальных расходов воды. Кратко рассмотрим основные методы расчётов пойменной составляющей максимальных расходов воды. Это в первую очередь методика, рекомендуемая директивными документами [2, 8], хотя и устаревшими, но не отменёнными. Она основана на формуле Шези, т.е. на концепции равномерного движения:

$$Q = Q_p + Q_n = \omega_p C_p \sqrt{h_p I_p} + \omega_{n1} C_{n1} \sqrt{h_{n1} I_{n1}} + \omega_{n2} C_{n2} \sqrt{h_{n2} I_{n2}},$$

где индексы «р» и «п» означают, что параметры относятся к русловой «р» или пойменной «п» частям потока; C — коэффициент Шези; I — уклон водной поверхности; h — средняя глубина.

Помимо неучёта неравномерности движения и массообмена между русловым и пойменным потоками в этой методике используется уклон водной поверхности пойменного потока I_n , который не измеряется. Его рекомендуется приравнять уклону водной поверхности руслового потока, что весьма далеко от истины. Более современной является эмпирическая методика, разработанная на кафедре гидрометрии РГГМУ и основанная на эмпирических зависимостях $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(F_n/(F_p + F_n), n_n/n_p)$, приведённых на рис. 5.

Как видно на рис. 5, эти зависимости разработаны для двух типов взаимодействия потоков — второго, характеризуемого расхождением осей, и третьего — при их схождении.

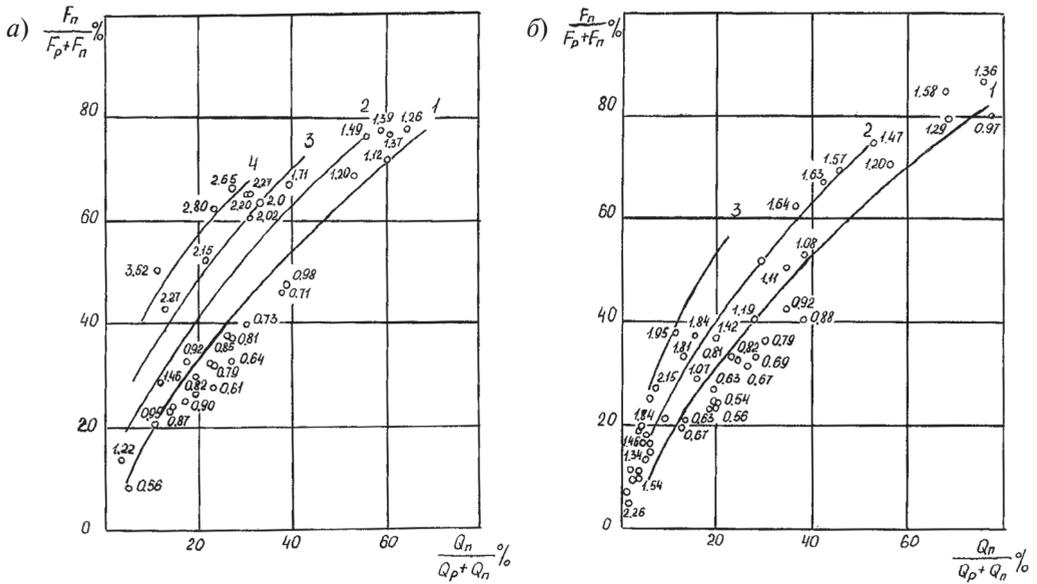


Рис. 5. Кривые $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(F_n/(F_p + F_n), n_n/n_p)$ (по С.Л. Галактионову):
 а и б — соответственно третий и второй типы взаимодействия потоков;
 около точек значения n_n/n_p : 1 — $n_n/n_p = 1,0$; 2 — $n_n/n_p = 1,5$; 3 — $n_n/n_p = 2,0$; 4 — $n_n/n_p = 2,5$

Результаты проведённого анализа позволяют сделать следующие выводы и предложения:

- несовершенство методов расчётов максимальных расходов воды, основанных на математической статистике, в условиях нестационарности природных процессов, приводит к необходимости их совершенствования или разработки принципиально новых методов расчётов;
- одной из таких является методика, основанная на определении максимальных уровней воды и морфометрических характеристиках не только в расчётном створе, но и на расчётном участке;
- необходима разработка новых морфометрических характеристик русел, особенно пойм, аналогичных углу α , характеризующих особенности морфологического строения расчётного участка и определяющих гидравлику русловых и пойменных потоков;
- необходимо совершенствование методов расчётов пойменной составляющей при расчётах максимальных, особенно катастрофических расходов воды;
- следует модернизировать таблицы для определения коэффициентов шероховатости, в частности, за счёт учёта в них глубин и эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. — СПб.: РГГМУ, 2007. — 314 с.
2. *Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 426 с.
3. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Скоморохова Е.М.* Морфометрические характеристики русел и пойм и их использование в гидравлических расчётах. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 30, с. 36–40.
4. *Барышников Н.Б., Пагин А.О., Селина Т.С., Твердохлебов А., Демидова Ю.А.* Пропускная способность пойменных русел. // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 5–13.
5. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Бурцев К.С.* Влияние прирусловых валов на процесс взаимодействия русловых и пойменных потоков. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 19–24.
6. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 375 с.
7. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 310 с.
8. *Карасёв И.Ф.* Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 310 с.
9. *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.
10. *Чоу В.Т.* Гидравлика открытых каналов. — М.: Стройиздат, 1969. — 464 с.