

Н.Б. Барышников, Д.И. Исаев, М.С. Дрегваль, И.С. Гаврилов

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВЫХ И ПОЙМЕННЫХ ПОТОКОВ

N.B. Baryshnikov, D.I. Isaev, M.S. Dregval, I.S. Gavrilo

INTERACTION CHANNEL AND FLOODPLAIN FLOWS

Изложена методика расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, находящихся под воздействием потоков поймы. Она основана на методике А.В. Караушева, разработанной для потоков в руслах простых форм сечения, и учете эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков. Выполнена оценка зоны воздействия руслового потока на пойменные. Установлено, что ширина этой зоны находится в зависимости от шероховатости поверхности поймы.

Ключевые слова: средняя на вертикали скорость, эффект взаимодействия потоков, методика, формула Шези, угол α , русловая составляющая, погрешность расчетов.

An approach to computing the average velocities of flow in a vertical profile, which are impacted by the floodplain currents, is presented. This approach is based on A. Karauшев's method that was developed for description of currents in channels with simple cross-section's shapes taking into account the riverbed and floodplain flows interaction. Dimensions of the zone of influence of the riverbed flow component onto the floodplain flows were estimated. It was found that the width of this zone depends on the roughness of the floodplain surface.

Keywords: average velocity on the measuring vertical, effect of the flows interaction, approach, Chezy equation, angle α , riverbed component, computational error.

Известно [1, 2, 6], что особенности морфологического строения участка расположения расчетного морфоствора определяют гидравлику потоков в руслах с поймами. Именно это позволило разработать типизации процессов взаимодействия русловых и пойменных потоков. В частности, в РГГМУ [1, 3] была разработана типизация, основанная на учете морфологических особенностей строения участка, расположенного ниже расчетного створа. В ней выделено пять типов взаимодействия потоков (рис. 1). Как видно на рисунке, в качестве основного фактора принято расположение динамических осей взаимодействующих потоков относительно друг друга. В то же время направление динамических осей этих потоков определяется направлением геометрических осей русла и поймы. Не останавливаясь на детальном анализе этой типизации, так как он выполнен в ряде работ [1, 5, 6 и др.], отметим лишь, что средние скорости

русловых потоков при воздействии на них пойменных потоков могут существенно отличаться от аналогичных, но определенных по методике, основанной на допущении о равномерности движения потоков, то есть на основе формулы Шези.

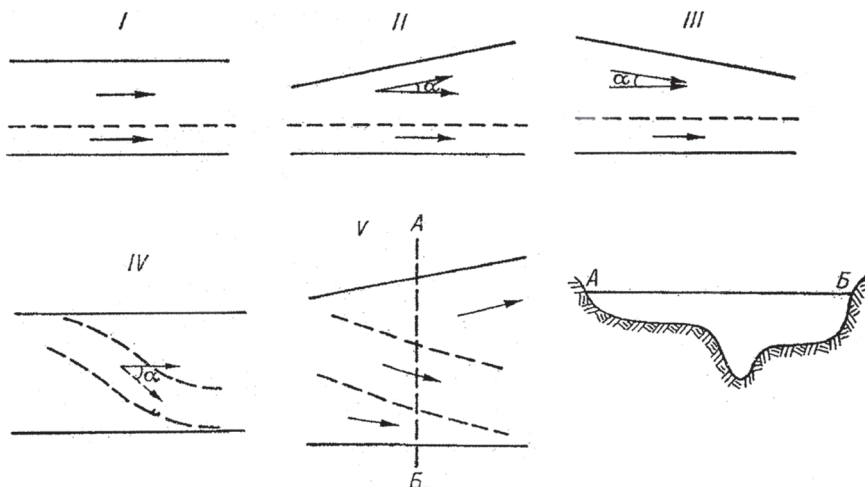


Рис. 1. Схема типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков:
I–V — типы взаимодействия руслового и пойменного потоков

Анализ натурной информации по более, чем пятидесяти рекам бывшего Советского Союза позволил получить зависимость для расчетов средних скоростей русловых составляющих потоков от средних глубин и углов α [1, 5 и др.] вида (рис. 2)

$$\frac{v_p}{v_{p.б.}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б.}}, \alpha\right),$$

где α — угол между динамическими осями взаимодействующих русловых и пойменных потоков, принят положительным при схождении осей потоков, то есть при третьем их типе, и отрицательным при расхождении осей потоков, то есть при втором их типе; v и h — соответственно средние скорости и глубины русловых потоков; p и $p.б.$ означают, что значения параметров относятся к русловым составляющим потоков при расчетном « p » уровне и « $p.б.$ » — уровне затопления бровки прирусловых валов.

Как видно на рис. 2, средние скорости русловых потоков при изменении глубин и углов α могут увеличиваться в несколько раз при втором типе взаимодействия потоков и, наоборот, уменьшаются в разы при третьем, то есть при вторжении пойменных вод в русловую поток. Таким образом, характер изменения средних скоростей русловых составляющих потоков при изменении глубин и углов α зависит от особенностей морфологического строения участка расположения морфоствора. При воздействии пойменного потока изменяется не только величина средних скоростей русловых потоков, но и средних на вертикалях скоростей. Более того, как правило, наблюдается смещение максимума этих скоростей в сторону, противоположную пойме.

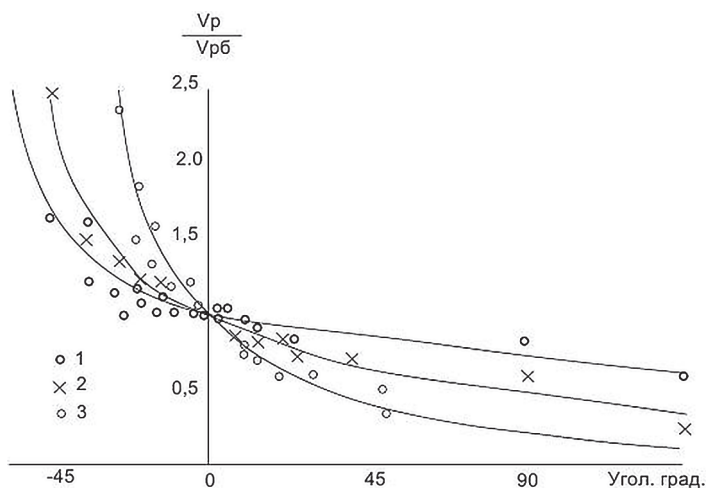


Рис. 2. Кривые $v_p/v_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$:
 1 — $h_p/h_{p.б.} = 1,10$; 2 — $h_p/h_{p.б.} = 1,25$; 3 — $h_p/h_{p.б.} = 1,50$

Одним из первых это выявил В.Н. Гончаров [4] на основе анализа данных экспериментальных исследований на моделях русла с односторонними и двухсторонними поймами, выполненными из бетона (рис. 3). Как видно на рисунке, при первом и третьем типах взаимодействия потоков наблюдается не только уменьшение средних скоростей русловых составляющих потоков, но и смещение максимумов средних на вертикалях скоростей в сторону, противоположную пойме (рис. 3, II, III). Более сложная структура скоростного поля руслового потока наблюдается при двухсторонней пойме (рис. 3, IIIa). Хотя средняя скорость потока тоже уменьшается, но максимальная скорость находится почти посередине сечения.

Существенно отлична структура руслового потока при втором и четвертом типах взаимодействия потоков (рис. 3, IV). При односторонней пойме (рис. 3, IV) уменьшения скоростей не наблюдается. При двухсторонней пойме происходит смещение максимума скоростей в сторону поймы, на которой пойменный поток движется с большими скоростями (рис. 3, IVa).

Даже предварительный анализ лабораторных данных позволяет считать, что под воздействием пойменного потока происходит трансформация скоростного поля руслового потока. Более четко эта трансформация проявляется при анализе, к сожалению, ограниченного объема натуральных данных [1, 2, 3]. Подробное изучение этих данных позволило установить, что на малых и средних реках трансформация скоростного поля руслового потока происходит по всей его ширине, а на больших, таких как Амур, Обь, Волга и других, она затрагивает только часть припойменного руслового потока [1, 2, 3].

В качестве примера рассмотрим трансформацию поля скоростей руслового потока под воздействием пойменного потока при больших углах схождения (рис. 4 и 5) динамических осей потоков ($\alpha \approx 50$ и 30°).

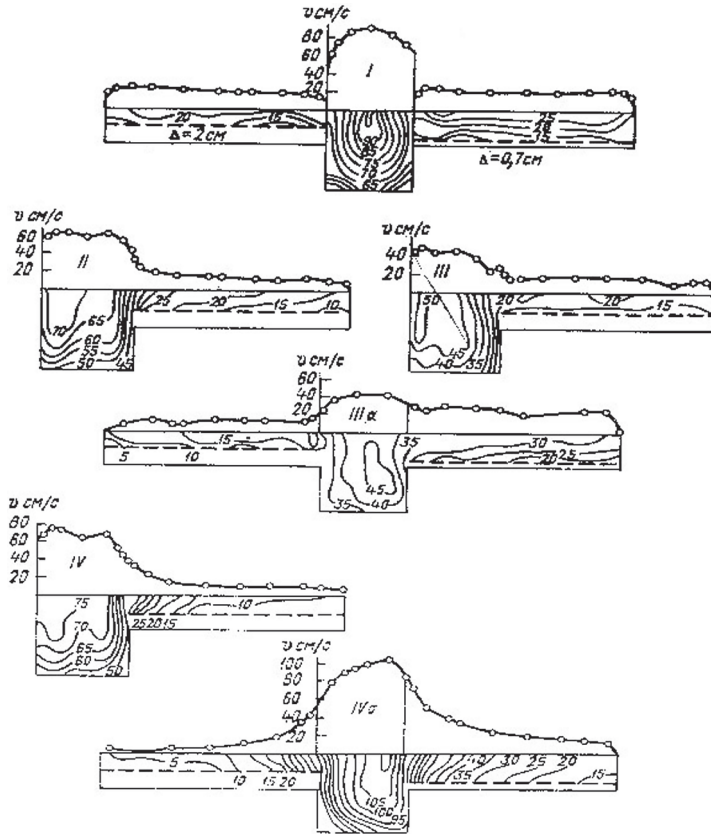


Рис. 3. Поля скоростей потоков в руслах с поймами при различных типах взаимодействия (по данным экспериментов при $h_p = 9$ см):
 I — изолированные русло и поймы; II — первый тип взаимодействия потоков;
 III и IIIa — перетекание из пойм в русло; IV и IVa — перетекание из русла в поймы

Как видно на рис. 4, где приведены кривые распределения по ширине средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потоков, полученные, как по данным измерений при различных, в том числе и наибольших уровнях, так и на основе результатов расчетов по методике А.В. Караушева [7], основанной на формуле Шези, последняя кривая резко отклоняется в сторону завышения от аналогичной, полученной по данным измерений при наивысшем уровне (805 см). Величины этих отклонений достигают 370 %.

Аналогичная картина имеет место и на других реках, например на р. Конде у дер. Чантырья (рис. 5), на р. Бобр у с. Куты и др. Однако на ряде рек этой группы (табл. 1), где углы схождения динамических осей потоков русла и поймы малы, наблюдается существенно отличная картина изменения скоростей руслового потока под влиянием пойменного.

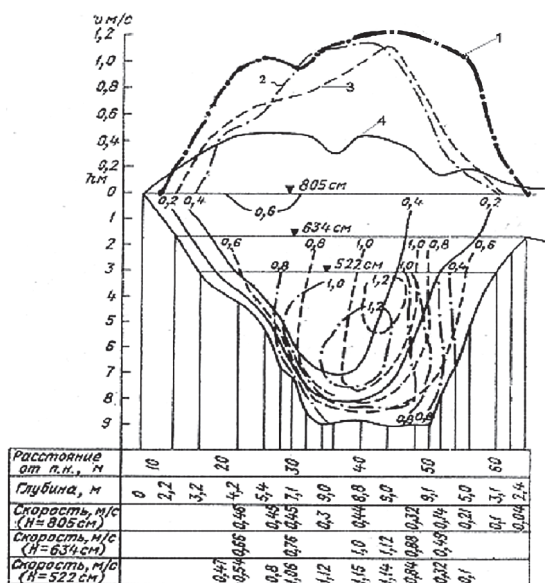


Рис. 4. Профиль поперечного сечения с изотaxами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Ветлуги – д. Быстри: 1 – расчетная кривая по формуле Шези при уровне 805 см; данные натуральных измерений 1968 г. при уровнях: 2 – 522 см, 3 – 634 см, 4 – 805 см

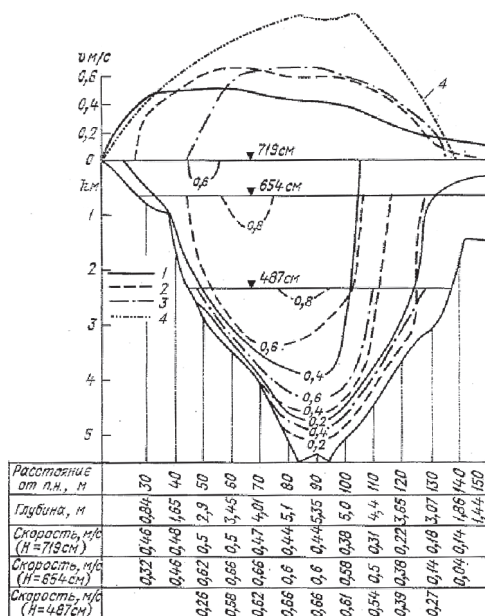


Рис. 5. Профиль поперечного сечения с изотaxами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Конда – д. Чантырья. Данные измерений 1966 г. при уровнях: 1 – 719 см, 2 – 654 см, 3 – 487 см, 4 – расчетная эпюра при уровне воды 718 см

Для разработки методики расчетов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков был использован, к сожалению, ограниченный объем натурной информации, а именно сведения об измеренных детальным способом расходах воды на пойменных створах при наивысших уровнях, когда пойма была затоплена. Используются следующие данные по десяти рекам, находящимся на территории бывшего Советского Союза. На шести из них процесс взаимодействия потоков осуществлялся по третьему типу на двух — по пятому и на одном по второму (табл. 1). Следует отметить, что информация по р. Луге использовалась для оценки надежности расчетных зависимостей.

На основе данных о максимальных расходах воды и площадях поперечного сечения при соответствующих уровнях воды были определены средние скорости русловых составляющих потоков,

$$\bar{v} = \frac{Q}{F} = C\sqrt{\bar{h}I} = \frac{\bar{h}^{2/3}I^{1/2}}{n},$$

где C — коэффициент Шези; \bar{h} — средняя глубина; I — уклон водной поверхности; n — коэффициент шероховатости.

Учитывая, что уклоны водной поверхности либо не измеряются, либо погрешности их измерений велики, да и точность определения коэффициентов шероховатости низкая, было решено принять $I^{1/2}/n = \beta$. Тогда $\bar{v} = \beta\bar{h}^{2/3}$. Отсюда $\beta = \bar{v}/(\bar{h}^{2/3})$. Далее было сделано допущение, основанное на разработках отечественных исследователей [2, 4 и др.], о том, что коэффициент β может быть так же применен к расчету средних на вертикалях скоростей потоков, то есть

$$v_i = \beta h_i^{2/3}.$$

Здесь v_i и h_i — средние на вертикалях скорости и глубины русловых составляющих потоков. По этой методике были рассчитаны средние на вертикалях скорости v_{pi} при наивысших расходах воды и на основе натуральных данных определены погрешности их расчетов $\Delta v_i = v_{изм i} - v_{pi}$ и $\Delta v_i/v_{изм i} \%$. Следует отметить, что максимальные расходы, как правило, не измеряются особенно на пойменных створах, а рассчитываются либо статистическими методами, либо по данным измерений параметров морфостворов. В частности, коэффициент β может быть определен по приведенному выше выражению, то есть $\beta = I^{1/2}/n$. При этом значения n и I определяются по данным полевых измерений, в частности по описанию участка расположения морфоствора и соответствующим таблицам для определения коэффициентов шероховатости (И.Ф. Карасева, В.Т. Чоу и др.).

Учитывая, что в расчетах были использованы данные измерений расходов воды детальным способом, при котором скоростные вертикали располагались через равные интервалы, то для каждого расчетного створа были вычислены средние и максимальные значения погрешностей. Полученные по этой методике значения погрешностей расчетов приведены в табл. 1. Эти погрешности в основном вызваны изменением значений средних на вертикалях скоростей русловых потоков под воздействием на них пойменных потоков, то есть возникновения при этом эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков [1, 5], а также учитывают погрешности измерений.

Таблица 1

Сведения о величинах средних и максимальных погрешностей расчетов средних на вертикалях скоростей русловых потоков при их взаимодействии с потоками поймы при третьем – пятом их типах, на основе методики Шези – Маннинга

№ п/п	Река, пост	Тип взаимодействия	Угол α , °	Погрешности расчетов, %	
				$(\Delta v/v_{изм})_{ср}$	$(\Delta v/v_{изм})_{макс}$
1	р. Ветлуга – д. Быстри	III	50	215	373
2	р. Ветлуга – д. Дубники	III	3	23,1	81,5
3	р. Конда – д. Чантырья	III	30	130	183
4	р. Амур – д. Кумара	III	4	9,5	23
5	р. Крыловка – д. Крыловка	V	9	84	109
6	р. Нестеровка – рзд. Таловый	V	22	145	311
7	р. Пьяна – д. Камкино	II(IV)	-45	30,2	35,3

Учитывая, что объем натурной информации при третьем и, особенно, при втором типах взаимодействия потоков ограничен, в качестве дополнительных были использованы данные измерений расходов воды при четвертом и пятом типах, процесс взаимодействия которых на этих реках преимущественно происходит по третьему типу. При этом осредненные значения угла $\bar{\alpha}$ между динамическими осями взаимодействующих по пятому типу потоков определялись по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \Delta h_i \alpha_i}{h_i}$$

Здесь Δh_i — интервал глубин соответствующий значению угла α_i .

На основе информации, приведенной в табл. 1, были построены графические зависимости $(\Delta v/v_{изм})_{ср} = f(\alpha)$ и $(\Delta v/v_{изм})_{макс} = f(\alpha)$, приведенные на рис. 1. Как видно на рисунке, эти зависимости достаточно тесные и близки к линейным. Коэффициенты корреляции для них, соответственно, равны 0,80 и 0,69.

Безусловно, эти зависимости нуждаются в уточнении на основе большего объема исходной информации и после этого вполне могут быть использованы для корректировки значений средних на вертикалях скоростей, рассчитанных на основе методики А.В. Караушева [7]. Таким образом, методика расчетов предлагается в следующем виде. По плано-высотным крупномасштабным материалам определяют угол α и тип взаимодействия потоков. Методика определения угла α основана на работах отечественных исследователей [1, 5], доказавших, что угол α может быть определен по крупномасштабным плано-высотным материалам как угол между осредненными направлениями изобат в русле реки и горизонталей на пойме при отметке расчетного уровня воды. При этом точность определенного таким образом угла α будет составлять $\pm 3^\circ$ [5]. По значению угла α и графику $(\Delta v/v)_{изм} = f(\alpha)$ определяют (рис. 6) величину погрешности расчетов $(\Delta v/v_{изм})_{ср}$, обозначим ее m , то есть

$$\left(\frac{\Delta v}{v_{изм}} \right)_{ср} = m,$$

которая приравнивается величине изменения скоростей руслового потока под влиянием потока поймы. По величине m определяется значение $v_{изм}$, исходя из формулы

$$m = \frac{v_{изм} - v_p}{v_{изм}}$$

После простейших преобразований получают

$$v_{изм} = v_p(m - 1).$$

Здесь v_p — соответствующее значение средней на вертикали скорости руслового потока, определенной по методике А.В. Караушева, то есть на основе допущения о равномерном движении.

Таким образом, по предлагаемой методике, основанной на введении поправок к рассчитанным по формуле Шези – Маннинга значениям средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, получается близкое к фактическому значение этих скоростей. К сожалению, контрольные расчеты были выполнены по данным только одной реки Луги у пос. Толмачево. Погрешность расчетов составила 15 % против 56 % по методике, основанной на формуле Шези – Маннинга.

Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 6, можно получить как для второго типа взаимодействия потоков, так и для пойменных вертикалей.

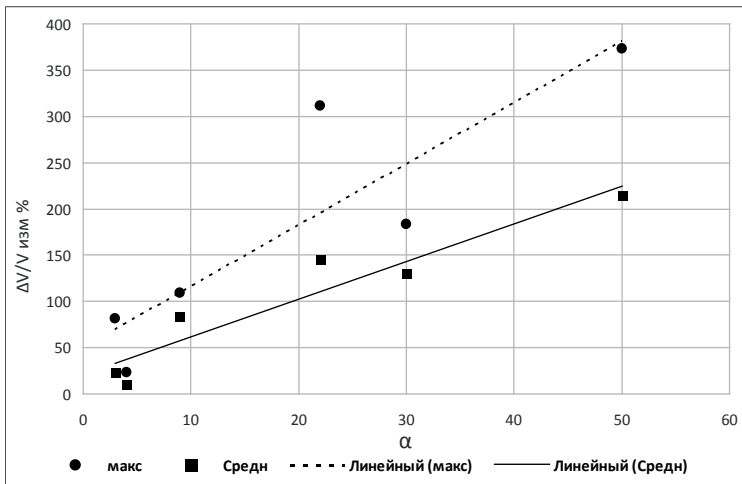


Рис. 6. Зависимости средних и максимальных погрешностей расчетов средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потока от углов α (III и V типы взаимодействия потоков)

К сожалению, качество натурной информации о пойменных составляющих максимальных расходов воды низкое. При сложном рельефе и большей, чем в русловой части, ширине пойменных потоков количество скоростных вертикалей на пойме, как правило, меньше, чем в русле. Иногда оно ограничивается одной-двумя вертикалями.

Поэтому получить зависимости, аналогичные, приведенным на рис. 6 для пойменной составляющей, в настоящее время не представляется возможным. Несмотря на это можно констатировать, что воздействие руслового потока на скоростное поле пойменного, по данным экспериментальных исследований на абстрактных моделях русел с гладкими поймами, достигает 5–6 ширин руслового потока [5]. Анализ же натуральных данных позволяет сделать вывод о том, что это влияние, находясь в зависимости от шероховатости и глубины затопления поймы, распространяется на значительно меньшую ширину пойменного потока. На поймах, интенсивно заросших кустарником и лесом, это влияние ограничивается одной-двумя ширинами руслового потока.

В заключение следует отметить, что это первые шаги в разработке данной расчетной методики. Они выполнены только для условий третьего – пятого типов взаимодействия потоков и то — на ограниченном объеме исходной информации. По-видимому, необходимо провести аналогичные расчеты для условий второго типа взаимодействия потоков, характеризующегося расхождением их динамических осей, а также для пойменных составляющих потоков. Эти расчеты можно будет выполнить только при наличии надежной натурной информации.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: РГГМУ, 2012.
2. *Барышников Н.Б.* О некоторых проблемах в гидрологии // Учен. зап. РГГМУ. 2007. № 5. — С. 9–13.
3. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Бурцев К.С., Поташко Е.А.* Влияние прирусловых валов на процесс взаимодействия русловых и пойменных потоков // Учен. зап. РГГМУ. 2012. № 26. — С. 19–24.
4. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1962.
5. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.
6. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.
7. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеиздат, 1969.