

*Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина, П.П. Овсейко, В.А. Иванов*

## ПОЙМЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

*N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina, P.P. Ovseyko, V.A. Ivanov*

## A FLOODPLAIN COMPONENT OF THE MAXIMUM WATER DISCHARGES

*На основе натурных данных выполнена оценка доли пойменной составляющей в максимальных расходах воды. Установлена её зависимость от морфометрических характеристик русел и пойм, эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков и гидравлических сопротивлений пойм. Выявлено воздействие прирусловых валов на гидравлику пойменных потоков и пропускную способность русел и пойм.*

*Ключевые слова: русло, пойма, эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, доля пойменной составляющей, ширина, глубина, водоворотная зона, зависимость, гидравлика потока, прирусловые валы.*

*Assessment of contribution of a floodplain component of the maximum water discharges was performed based on field experiment data. Its dependence of the river channel and floodplain morphometric characteristics, interaction between the riverbed and floodplain flows, and floodplain hydraulic resistance was found. Impact of the river levees on hydraulic patterns of floodplain flow and discharge capacity of riverbeds and floodplains was revealed.*

*Key words: riverbed, floodplain, effect of interaction of riverbed and floodplain flows, contribution of a floodplain component, river width, river depth, eddy current zone, dependence, stream hydraulic, river levees.*

Усилившаяся циклоническая деятельность, обусловленная наметившимся изменением климата, явилась причиной резкого увеличения максимальных расходов воды и, как следствие, катастрофических наводнений, нанесших огромный экономический ущерб как в различных регионах России, так и в других государствах. Эти наводнения в сочетании с халатностью чиновников приводили не только к большим экономическим ущербам, но и уносили человеческие жизни, как это было, например, в г. Крымске.

К сожалению, измерения катастрофических и близких к ним расходов воды, особенно на пойменных гидростворах, как правило, не производились. Особенно остро при этом стоит вопрос измерений пойменной составляющей расходов воды, что обусловлено скоротечностью прохождения экстремальных расходов воды, требованиями техники безопасности, устаревшими методами и аппаратурой, применяемых на сети Росгидромета, недостаточной квалификацией персонала, а также большой шириной пойм. Исключением, пожалуй, являются измерения максимальных расходов воды на

р. Амур у городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре с помощью профилографа на гидростворах, расположенных у мостовых переходов, где пойма была перекрыта сплошной дамбой, а весь поток сосредоточен в основном подмостовом русле. Измеренные расходы воды соответственно составляли 46,0 и 42,0 тысячи м<sup>3</sup>/с. Аналогичные измерения начали производить в последнее пятилетие на станциях нескольких УГМС (Северном, Дальневосточном и др.), которые были оборудованы современными приборами и оборудованием. Однако эти измерения, к сожалению, являются исключением, а не правилом. Поэтому перейдём к анализу сведений о пойменной составляющей, используя в основном материалы натурных измерений в доперестроичный период, когда качество натурной информации, можно считать, вполне соответствовало требованиям к ней.

Следует отметить, что Д.Е. Скородумов [10] считал, что даже, если погрешность измерений и расчётов пойменной составляющей составляет 40 %, а её доля в максимальном расходе воды 50 %, то это составит погрешность общего расхода воды всего в 20 %. С этим нельзя согласиться, так как и русловая составляющая этого расхода в паводочный период измеряется с погрешностью, как правило, превышающей 10 %. Следовательно, сумма этих погрешностей будет существенно больше допустимой.

Таким образом, всё это свидетельствует о необходимости совершенствования методики не только измерений, но и расчётов пойменной составляющей максимальных расходов воды. При этом осложняющим фактором является влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Действительно, как показал анализ лабораторных данных [1, 2, 3 и др.], ускоряющее воздействие руслового потока на пойменный осуществляется на расстоянии в 5–6 ширин руслового потока. Это приводит к тому, что при использовании методов расчётов, основанных на теории равномерного движения, т.е. на формулах Шези-Павловского, Шези-Маннинга или других [7, 8] аналогичных им формулах, получаются значительно заниженные величины расходов воды пойменной составляющей. Более того, расчёт коэффициентов шероховатости на основе натурных данных и приведённых выше формул, приводит к их существенно заниженным значениям (до 0,014–0,016). Однако, как показали исследования, проведённые в РГГМУ [4, 5 и др.], ширина, ускоряющего воздействия руслового потока на пойменный, на конкретных реках существенно меньше. Это в первую очередь обусловлено влиянием прирусловых валов и шероховатости пойм. Действительно, последняя существенно отличается от шероховатости лабораторных моделей, на которых пойма, как правило, выполняется из бетона, т.е. по существу является гладкой, да и прирусловые валы на моделях, как правило, отсутствовали. В то же время роль воздействия последних как на эффект взаимодействия русловых и пойменных потоков, так и на скоростные поля последних, достаточно велика. Всё это приводит к значительному сокращению ширины зоны ускоряющего воздействия руслового потока на пойменный, ограничивая её значение в одну — четыре ширины руслового потока [2, 4, 6].

Рассмотрим более детально воздействие прирусловых валов на скоростные поля руслового и пойменного потоков. Так, в РГГМУ был выполнен детальный анализ этой проблемы и установлено, что прирусловые валы существенно ограничивают величину воздействия руслового потока на пойменный. Действительно, высокие, сильно заросшие растительностью, особенно деревьями, прирусловые валы как бы разделяют руслопойменный поток на два практически самостоятельных потока — русловой и

пойменный [9]. В качестве примера можно привести р. Лугу у пос. Толмачёво, где в 1977 г. прошёл близкий к катастрофическому максимальный расход воды (рис. 1).

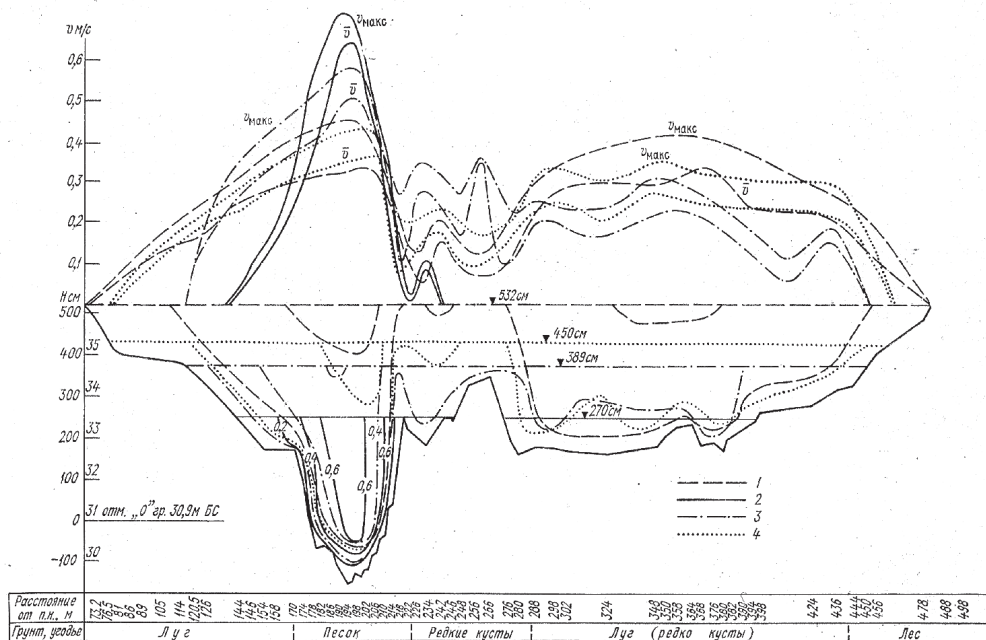


Рис. 1. Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних и максимальных на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги — пос. Толмачёво. Данные измерений 1977 г. при уровнях: 1 — 532 см; 2 — 450 см; 3 — 389 см; 4 — 270 см.

При этом расходе средние и максимальные скорости, а также наибольшие скорости на скоростных вертикалях пойменной и русловой составляющих практически сравнялись (см. таблицу).

**Сведения о максимальных и наибольших из средних на вертикалях скоростей р. Луги у пос. Толмачево в 1977 г.**

Расчетный уровень, см	Скорость потока в русле		Скорость потока на пойме	
	максимальная	наибольшая из средних на вертикали	максимальная	наибольшая из средних на вертикали
270	0,72	0,65	-	-
389	0,58	0,51	0,32	0,24
450	0,44	0,37	0,36	0,28
532	0,45	0,34	0,42	0,34

Как видно в таблице, при малых глубинах затопления ( $H = 389$  см) максимальные скорости руслового потока (0,58 м/с) почти в два раза превышают аналогичные

в пойменном потоке, т.е. эти потоки весьма существенно отличаются друг от друга. Однако при наибольших глубинах затопления поймы ( $H = 532$  см) эти скорости почти сравнялись (0,45 и 0,42 м/с — соответственно). Более того, наибольшие из средних на скоростных вертикалях стали равными (0,34 м/с) как в русловой, так и в пойменной составляющих потока. Это является явным доказательством самостоятельности пойменного потока и подтверждает формирование двух практически одинаковых руслового и пойменного потоков.

В то же время на той же реке Луге, но у д. Воронино, где имеется чётко выраженный прирусловой вал, высотой примерно равный 0,8 м, ускоряющее воздействие руслового потока на пойменный незначительно. Как видно на рис. 2, несмотря на то что уровень воды увеличился на 28 см и скорости русловой части потока существенно увеличились от 0,42 до 0,65 м/с, ускоряющего влияния руслового потока на пойменный не обнаружено.

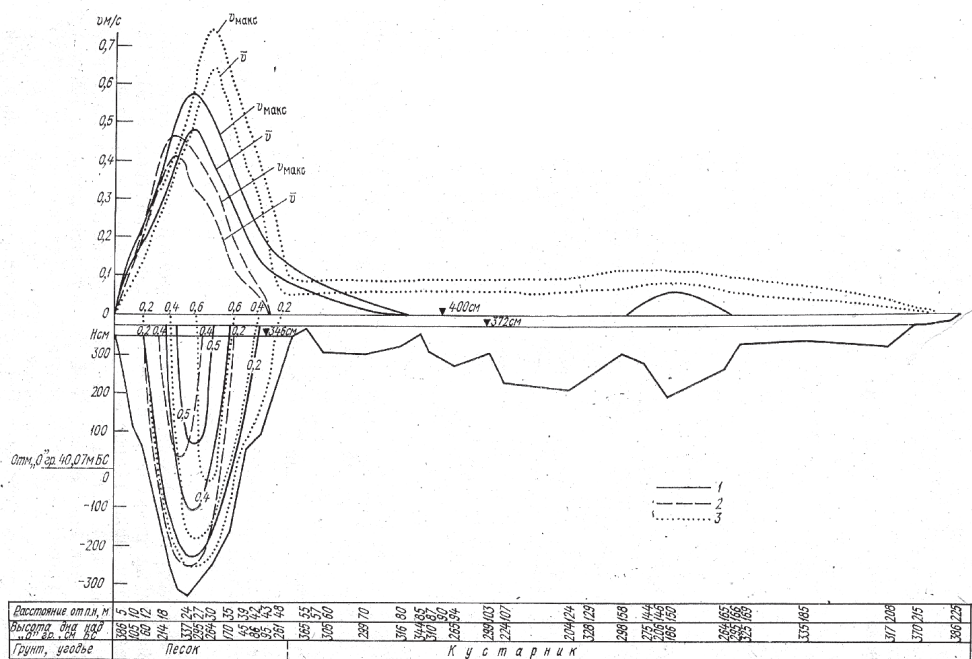


Рис. 2. Профиль поперечного сечения с изогипсами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги — д. Воронино.  
Данные измерений 1966 г. при уровнях: 1 — 372 см; 2 — 346 см; 3 — 400 см.

По-видимому, большое влияние на эти процессы так же оказывает тип руслового процесса и особенности морфологического строения участка расположения гидроствора. С учётом этих замечаний перейдём к рассмотрению оценки доли пойменной составляющей в общем максимальном или близком к нему расходе воды. Наиболее детальные исследования в этом направлении были проведены в РГГМУ в конце

прошлого столетия [3 и др.]. В их основу были положены данные измерений 56 максимальных расходов воды на пойменных створах, расположенных на территории бывшего Советского Союза, выполненных в конце прошлого века, когда точность измерений соответствовала предъявляемым к ней требованиям.

Следует отметить, что относительная величина пойменной составляющей  $Q_n/(Q_p + Q_n)$  максимальных расходов воды зависит от достаточно большого количества факторов, основными из которых являются: глубина затопления поймы, её ширина и шероховатость, определяющая сопротивление движению пойменного потока, её строение, находящееся в зависимости от типа поймы и, в конечном итоге, от типа руслового процесса и других факторов. Однако учесть влияние всех этих факторов в корреляционных зависимостях не представляется возможным. Поэтому было избрано два направления исследований. Первое — построение и анализ кривых зависимостей вида:  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(h_p/h_{p,6}, B_n/B_p)$  или  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(H', B_n/B_p)$ . Здесь  $H'$  — уровень воды над бровкой прируслового вала;  $Q$ ,  $h$ ,  $B$  и  $n$  — соответственно расход воды, площадь поперечного сечения, ширина и коэффициент шероховатости; индексы «п» и «р» означают, что параметры относятся к пойменной или русловой составляющим.

В литературе имеются лишь отрывочные сведения о доле пойменной составляющей в общем паводочном стоке рек бывшего СССР, но только в работе одного из авторов по данным наблюдений на 56 постах сети Росгидромета выполнен анализ этой величины [4, 5]. В основу анализа были положены кривые зависимостей отношений расходов воды пойменной составляющей к полному расходу воды  $Q_n/(Q_p + Q_n)$  от уровней воды ( $H'$ ), отсчитываемых от бровки прирусловых валов и от относительных глубин в русле ( $h_p/h_{p,6}$ ) (рис. 3). Результаты анализа позволили выделить четыре группы кривых, три из которых обоснованы данными наблюдений на сети Росгидромета, а четвертая — данными специальных исследований. Последующий анализ, основанный на данных наблюдений еще на 50 постах Росгидромета, подтвердив правильность выделения четырех групп кривых, несколько уточнил полученные ранее выводы.

К первой группе кривых, характеризующихся замедленным ростом доли пойменного расхода воды, как правило, относятся большие (Амур, Обь и др.) и средние реки с хорошо разработанным руслом. Оси руслового и пойменного потоков у этих рек либо параллельны, либо пересекаются под небольшими углами. Течение на пойме слабое, его наибольшие скорости не превышают 0,5–0,6 м/с. Типичным примером является р. Амур у с. Кумара, где при глубинах затопления поймы в 2 м, соответствующих максимальному расходу воды, близкому к 2 %-ной обеспеченности, доля пойменного расхода достигает только 1,4 %. Даже на р. Оби у г. Нефтеюганска, где ширина поймы и пойменных проток около 28 км, а ширина основного русла и протоки Юганская Обь 1866 м, через пойму и протоки, по данным И.В. Попова [9], проходит только 3500 м<sup>3</sup>/с (14,2 %), а через основное русло и Юганскую Обь — 21 200 м<sup>3</sup>/с (85,8 %).

Ко второй группе относятся средние и малые реки, имеющие широкую пойму ( $B_n/B_p \geq 6-12$ ; на р. Сож это значение достигает 20, на р. Крыловке — 30, а на р. Нестеровке — 39). Эти значения следует считать значительными, если учесть, что Наставлением [7] рекомендуется выбирать участки для расположения гидрологических постов либо без поймы, либо с поймой минимальной ширины. На реках этой группы оси руслового и пойменного потоков, как правило, пересекаются под большими

углами, в пределе достигающими 50–60°, что приводит к появлению четко выраженного кинематического эффекта в руслах с поймами. Кривые второй группы рек отличаются резким увеличением доли пойменной составляющей с ростом уровней (примерно до 50 % общего расхода), затем это приращение несколько замедляется и кривые  $Q_{п}/(Q_{р} + Q_{п}) = f(H)$  асимптотически приближаются к предельному значению  $Q_{п}/(Q_{р} + Q_{п})$  равному 75–86 %. Так, для р. Сож у г. Славгорода это значение равно 86 %, а для р. Ветлуги у с. Быстри — 80 %. Особенно интересны данные по р. Сож, где доля пойменной составляющей в интервале уровней 190–320 см остается постоянной, равной 86,0 %. Аналогичные данные получены и для ряда других рек (р. Друть у с. Городище 75,5 % и др.). По-видимому, дальнейшая экстраполяция не изменит это значение, являющееся предельным. К такому же предельному значению «стремятся» кривые  $Q_{п}/(Q_{р} + Q_{п}) = f(H')$  большинства других рек второй группы (р. Ветлуга — с. Быстри, р. Пьяна — с. Камкино).

Третья группа занимает промежуточное положение между первой и второй. Примером кривых этой группы являются кривые для р. Ветлуги у пос. Дубники и р. Мокши. Ход этих кривых характеризуется слабой, но значительно большей, чем у первой группы, интенсивностью роста доли пойменной составляющей с повышением уровня. Так, на р. Ветлуге у пос. Дубники наблюдался равномерный рост доли пойменной составляющей. Однако при уровне 190 см над отметкой бровки его значение достигло лишь 38 %.

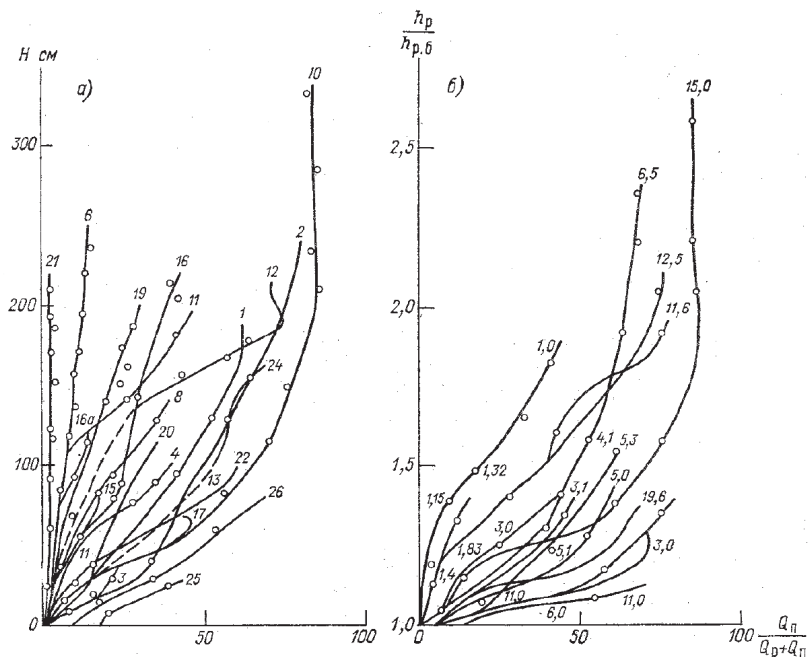


Рис. 3 Зависимости  $Q_{п}/(Q_{р} + Q_{п}) = f(H)$  (а) и  $Q_{п}/(Q_{р} + Q_{п}) = f(h_{р}/h_{р.б})$  (б):

6, 21 — первая группа рек; 1–4, 8, 10, 12, 13, 17, 20, 22, 25, 26 — вторая; 5, 7, 9, 11, 14–16, 18, 19, 23, 24 — третья; около кривых приведена относительная ширина поймы  $B_{п}/B_{р}$ .

Целесообразно выделить и четвертый тип кривых. На рис. 3 он не представлен, так как не является характерным для участков расположения гидрологических постов. Четвертый тип кривых характерен для пойменного массива свободного меандрирования, когда последний оконтуривается одной или несколькими излучинами. При этом оси руслового и пойменного потоков при затоплении массива могут пересекаться под очень большими углами ( $\alpha \geq 60^\circ$ ). На подобном участке р. Сож в 1970–1971 гг. Институтом водных проблем Белоруссии и ГГИ были проведены специальные работы по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков. В створе измерения оси этих потоков пересекались под углом  $135^\circ$ . При измерениях в русле были зафиксированы скорости обратного направления при пересечении руслового потока пойменным. Близкие результаты получены Д.Е. Скородумовым на одном из створов р. Луги, где оси руслового и пойменного потоков пересекались под углом  $\alpha = 90^\circ$  [10]. При увеличении уровней и мощности пойменного потока скорости руслового резко уменьшались и при больших наполнениях поймы были равны нулю, что объясняется образованием в русле водоворотной зоны, размеры которой увеличиваются с увеличением уровней [4, 5 и др.].

К сожалению, не все данные являются равно обеспеченными, поэтому могут быть использованы только как ориентировочные. Как вытекает из анализа имеющихся материалов и литературных источников, с ростом уровней воды доля пойменной составляющей возрастает. Для большинства рек второй и четвертой групп при максимальных расходах 1, 0,33 и тем более 0,1 %-ной обеспеченности следует ожидать, что она составит значение, близкое к 100 % ( $> 80\%$ ) общего расхода воды.

Кривые зависимости  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(h_p/h_{p,6})$  (рис. 3) в целом подтверждают выводы, основанные на анализе зависимости  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(H)$ . В то же время их взаимное расположение более четко определяется влиянием относительной ширины поймы ( $B_n/B_p$ ). Для конкретизации этого вопроса нами были построены графики зависимости  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(B_n/B_p)$  при постоянном значении глубин ( $h_p/h_{p,6}$ ) (рис. 4).

Методика построения следующая. По кривым  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(h_p/h_{p,6})$  (рис. 4б) определялись значения относительной пропускной способности пойм  $Q_n/(Q_p + Q_n)$  для значений  $h_p/h_{p,6} = 1, 1, 1, 2, 1, 3$  и  $1, 4$ . Ограничение значением  $h_p/h_{p,6} = 1, 4$  обусловлено резким сокращением количества исходной информации, необходимой для построения расчетных зависимостей при дальнейшем росте глубин.

Для указанных значений глубин по таблицам исходных данных были определены значения ширин пойм  $B_n/B_p$ , а затем построены соответствующие зависимости  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(B_n/B_p)$  для каждого из указанных значений  $h_p/h_{p,6}$ . Как видно на рис. 4, зависимости довольно четкие ( $\eta = 0,69–0,80$ , а  $\sigma = 20,5–30,3\%$ ), но отмечается существенное отклонение от расчетной кривой данных по р. Пра у пос. Деулино, что объясняется наличием на пойме реки значительных бессточных водоемов. Попытка получить зависимость пропускной способности поймы  $Q_n/(Q_p + Q_n)$  от ее гидравлического сопротивления ( $n_n/n_{p,6}$  или  $n_n$ ) не достигла успеха, хотя качественно такое влияние прослеживается. По-видимому, необходимо искать другие способы учета влияния сопротивления поймы на величину ее относительной пропускной способности.

Дополнительный анализ исходных данных показал, что доля пойменной составляющей также зависит от угла  $\alpha$ . Это вытекает из деления кривых зависимости

$Q_n/(Q_p+Q_n) = f(h_p/h_{p,6})$  на четыре группы. Действительно, одним из признаков деления указанных кривых на группы является значение угла  $\alpha$ . Так, к первой группе отнесены кривые для рек, где значения  $\alpha$  малы ( $\alpha < 15^\circ$ ), ко второй, наоборот, реки, где значения  $\alpha$  могут достигать  $40-60^\circ$ . К четвертой группе относятся реки с углами  $\alpha > 60^\circ$ , где в местах пересечения руслового и пойменного потоков формируется мощная водоворотная область. Третья группа занимает промежуточное положение между первой и второй.

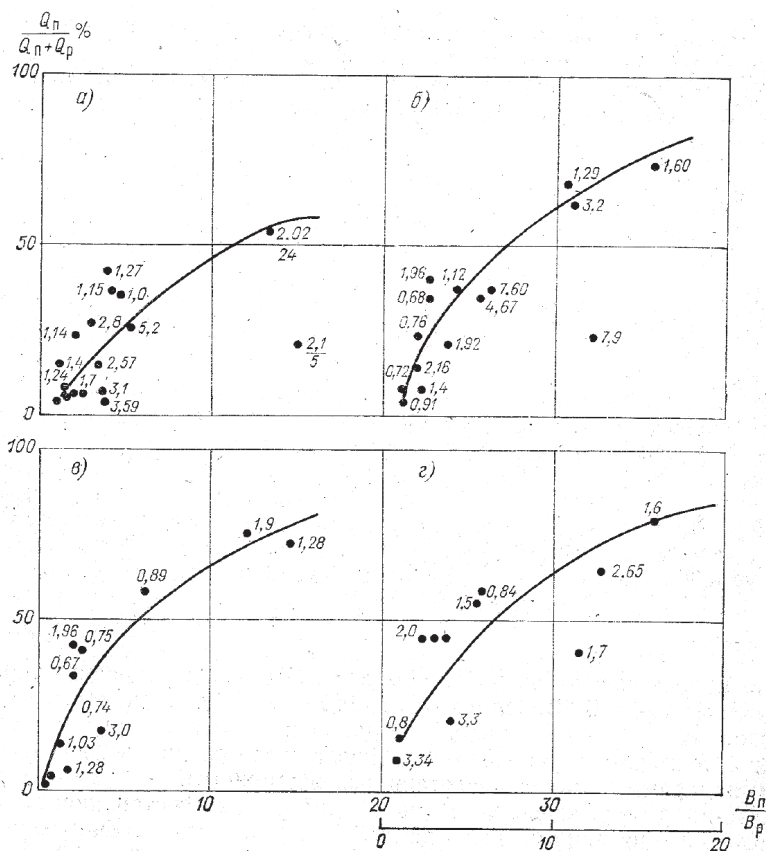


Рис. 4. Зависимости  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(B_n/B_p)$  при постоянных значениях относительных глубин.  $a - h_p/h_{p,6} = 1,1$ ;  $б - h_p/h_{p,6} = 1,2$ ;  $в - h_p/h_{p,6} = 1,3$ ;  $г - h_p/h_{p,6} = 1,4$ . Около точек приведены значения  $n_n/n_p$ .

Как указывалось, зависимость доли пойменной составляющей от определяющих параметров весьма сложная, многофакторная. В общем виде она может быть записана:  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f(h_p/h_{p,6}, B_n/B_p, \alpha, n_n/n_p)$ . Однако низкая точность и малое количество исходной информации затрудняют количественную оценку влияния каждого из определяющих факторов. В настоящее время можно лишь с уверенностью утверждать, что основными из них являются: относительная глубина потока, хорошо отражающая влияние глубины вреза русла относительно поймы и мощность руслового



потока, относительная ширина поймы и угол между динамическими осями руслового и пойменного потоков.

Исходя из этого, графические зависимости (рис. 3 и 4) могут быть рекомендованы для ориентировочных расчетов доли пойменной составляющей в максимальных расходах воды на участках русел с поймами, если их гидравлические сопротивления ( $n_p$  и  $n_n$ ) не выходят за пределы значений, которые встречались в исходных материалах, использованных при построении расчетных зависимостей. В соответствии со вторым направлением были получены графические зависимости вида:  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f[F_n/(F_p + F_n) \cdot n_n/n_p]$ .

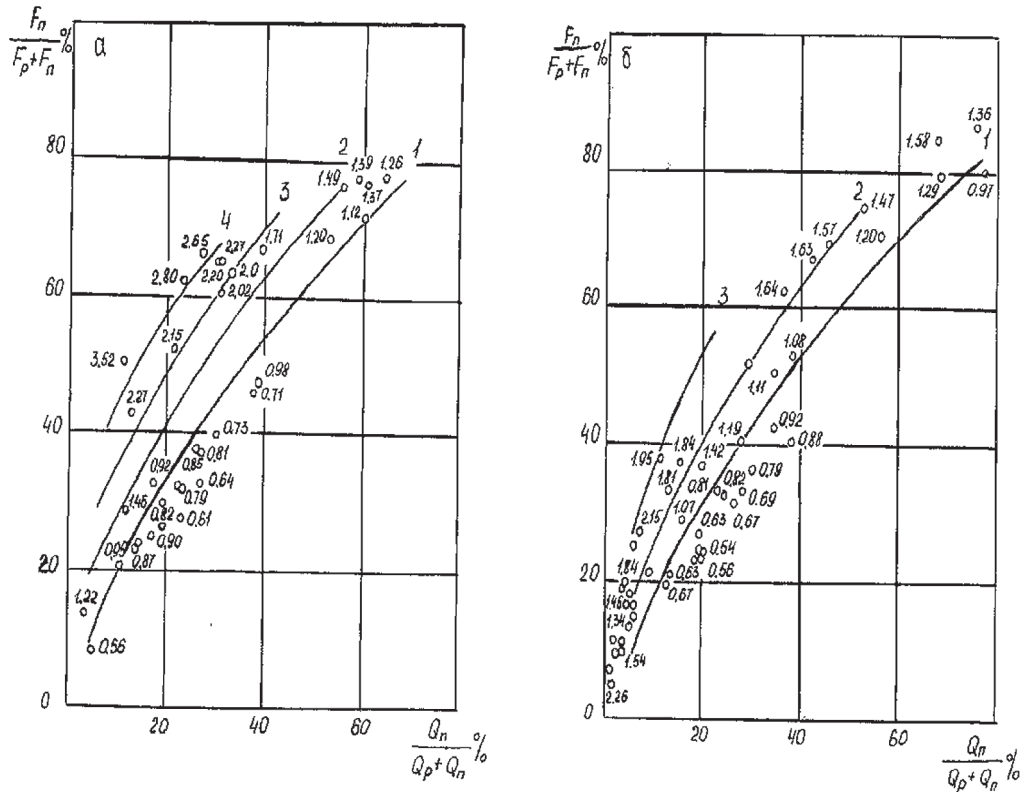


Рис. 5. Кривые  $Q_n/(Q_p + Q_n) = f[F_n/(F_p + F_n) \cdot n_n/n_p]$  (по С.Л. Галактионову).

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 —  $n_n/n_p = 2,5$ .

Как видно на рис. 5, зависимости четко выражены. Контрольные расчеты, проведенные на независимой информации, доказали их эффективность при средней погрешности расчетов, несколько большей 20 %.

Полученные корреляционные зависимости позволяют в первом приближении оценить долю пойменной составляющей в общем максимальном расходе воды. К сожалению, рекомендуемые методики не исключают субъективизма при получении

результатов при использовании полученных зависимостей, тем более, расчётных. Для их совершенствования необходим дополнительный банк данных о русловой и пойменной составляющих максимальных расходов воды и особенно катастрофических, совместно со сведениями о морфометрических характеристиках расчётных участков.

Выполненный анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы и предложения:

- доля пойменной составляющей в максимальных расходах воды, проходящих на равнинных реках по затопленным поймам, может достигать 100 % величины максимального расхода воды при углах пересечения взаимодействующих потоков  $\alpha \geq 90^\circ$ ;
- величина этой доли зависит от величины эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков;
- факторами, ослабляющими влияние этого эффекта, являются высота и степень зарастания прирусловых валов и высокая шероховатость поймы;
- высокие, заросшие мощной, особенно древесной растительностью, прирусловые валы подразделяют единый руслопойменный поток на два, практически слабо зависящих друг от друга, русловой и пойменный потоков;
- при гладкой пойме русловой поток оказывает убыстряющее воздействие на пойменный, на участке поймы шириной, ограниченной 5–6 ширинами руслового потока;
- в натуральных условиях ширина участка поймы, на котором осуществляется воздействие руслового потока, ограничена одной–четырьмя ширинами руслового потока;
- пойменный поток оказывает значительно большее тормозящее или ускоряющее воздействие на русловой, чем русловой поток на пойменный.

### Литература

1. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. — СПб.: РГГМУ, 2007. — 314 с.
2. *Барышников Н.Б.* Морфометрические характеристики русел и пойм. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 13, с. 13–16.
3. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С., Скоморохова Е.М., Поташко Е.А.* Коэффициенты шероховатости пойм. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 23, с. 13–20.
4. *Барышников Н.Б.* Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 426 с.
5. *Барышников Н.Б., Субботина Е.С.* Роль прирусловых валов в формировании полей скоростей руслопойменных потоков. // Метеорология и гидрология, 2013, с. 91–96.
6. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 310 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, ч.1. 3-е изд. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 384 с.
8. *Пагин А.О., Селина Т.С., Тимофеева О.Д.* Экспериментальные исследования влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт наносов. // Ученые записки РГГМУ, 2007, № 5, с. 111–118.
9. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 363 с.
10. *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.