

ГИДРОЛОГИЯ

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

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ НА ГИДРАВЛИКУ РУСЛОВОГО ПОТОКА И ТРАНСПОРТ ДОННЫХ НАНОСОВ

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

INFLUENCE OF THE EFFECT OF RIVER CHANNEL AND FLOODPLAIN FLOWS' INTERACTION ON HYDRAULICS OF THE CHANNEL FLOW AND SEDIMENT TRANSPORTATION

На основе анализа натурных данных и данных, полученных на физической модели русла с односторонней поймой, выявлено влияние эффекта взаимодействия потоков на гидравлику руслового потока и транспорт донных наносов. Определены величины поправочных коэффициентов к средним скоростям русловых потоков, рассчитанным на основе формулы Шези. Установлено, что в период подъёма уровней при прохождении паводков по затопленным поймам возрастают средние скорости русловых потоков и их транспортирующая способность. Это подтверждает присутствие процесса саморегулирования в системе «русловой поток – русло».

Ключевые слова: русло, эффект взаимодействия потоков, скорость, климат, расход донных наносов, максимальный расход воды.

Based on field data and data obtained from a physical model of river channel with a unilateral floodplain, influence of the effect of river channel and floodplain flows' interaction on hydraulics of the channel flow and sediment transportation was revealed. Values of adjustment factors applied to the channel flows average velocities computed by using Chezy's formula was determined. It was found that the average velocity of channel flows as well their transport capacity increase together with rising level of water over the inundated floodplain. This conclusion proves that the self-regulation process in the system "river flow – river channel" is the fact of the matter.

Key words: river channel, effect of flows interaction, velocity, climate, discharge of sediments, peak flow.

Происходящие в последние годы, и особенно в последние 15–20 лет, изменения климата привели к резкому увеличению интенсивности циклонической деятельности, в частности, над Европой. Следствием этого явилось резкое увеличение частоты и мощности ливней и, соответственно, катастрофических паводков. Особенно большое их количество и мощность наблюдались на реках Восточной Европы. Так, на р. Висле в 1997 г. прошёл катастрофический паводок максимальный расход которого примерно в 1,5 раза превысил расчётный

расход 1 %-ной обеспеченности, наблюдавшийся в 1924 г. Более того, в 2010 г. на р. Висле прошло ещё четыре катастрофических паводка, наибольший максимальный расход воды которых, по данным измерений на Вацлавской ГЭС, составил $8400 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. превысил расчётный расход 1 %-ной обеспеченности ($4000 \text{ м}^3/\text{с}$) более чем в 2 раза, к тому же было затоплено несколько городов и посёлков, в частности, подтоплены города Краков и Варшава и разрушено несколько гидротехнических сооружений.

К сожалению, как правило, максимальные расходы воды таких паводков не измерялись. Результаты же расчетов по гидротехническим сооружениям недостаточно точны, так как тарировка агрегатов ГЭС не производилась. Более того, при расчётах максимальных расходов, по данным ГЭС, как правило, не учитывается трансформация паводочной волны в водохранилище.

Такое положение с натурной информацией свидетельствует о необходимости совершенствования расчётных методов. К сожалению, наметившийся тренд температур и осадков указывает на необходимость совершенствования расчётных методов, основанных на использовании математической статистики или разработке принципиально новых методов и подходов. Одним из них является методика, основанная на определении максимально возможных наивысших уровней воды и определении морфометрических и гидравлических характеристик расчётных участков. Учитывая, что большинство рек России – равнинные, имеющие затапливаемые в периоды половодий и паводков поймы, необходимо перейти от методики, основанной на расчётах по формуле Шези, т.е. допущении о равномерном движении, к методикам, применяемым для расчётов неравномерного, неустановившегося и, более того, движения с переменным по длине расходом воды. Одним из первых такую методику применил Д.Е. Скородумов [6], использовавший для расчётов расходов воды в руслах с поймами уравнение движения потока с переменным по длине расходом воды в конечных разностях в виде:

$$I = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{\alpha_{кН} v_H^2 - \alpha_{кВ} v_B^2}{2gL} + \frac{v - v_g}{gF} \frac{Q_H - Q_B}{L} + \frac{\alpha_B}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (1)$$

где α_K и α_B – соответственно коэффициенты Кориолиса и Буссинеска; v_g – скорость массообмена между русловым и пойменным потоками; L – расстояние между створами; H и B – индексы, свидетельствующие о том, что параметры потока относятся к нижнему или верхнему гидростворам; v – средняя скорость потока; C – коэффициент Шези; h – средняя глубина; g – ускорение свободного падения; Q – расход воды; F – площадь поперечного сечения; t – время.

Недостатком этой методики является необходимость наличия сведений о гидравлических характеристиках по двум, расположенным вблизи друг от друга, гидростворам.

В РГГМУ была разработана методика расчётов пропускной способности русел с поймами [2], основанная на графических зависимостях вида $V_p/V_{p,б} = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$, для русловой составляющей (рис. 1).

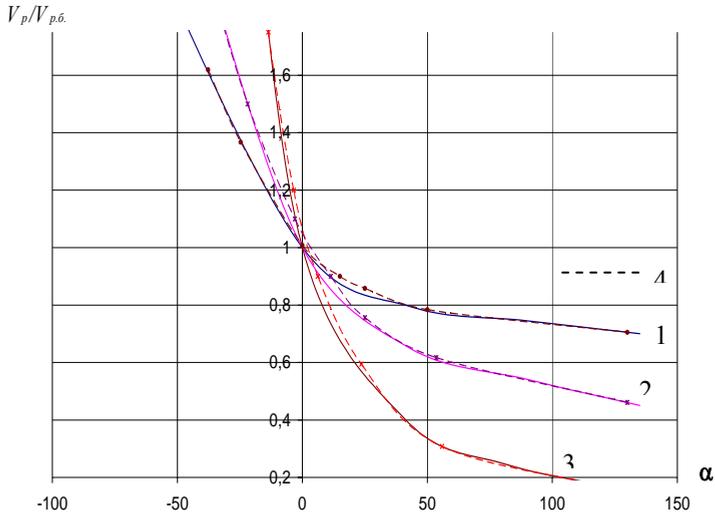


Рис. 1. Кривые $V_p/V_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$.

1 - $h_p/h_{p.б} = 1,10$; 2 - $h_p/h_{p.б} = 1,25$; 3 - $h_p/h_{p.б} = 1,50$; 4 - уточнённое положение кривых; α - угол между динамическими осями руслового и пойменного потоков

Для пойменной составляющей были получены графические зависимости вида $Q_n/(Q_p + Q_n) = f[F_n/(F_p + F_n); n_n/n_p]$ (рис. 2).

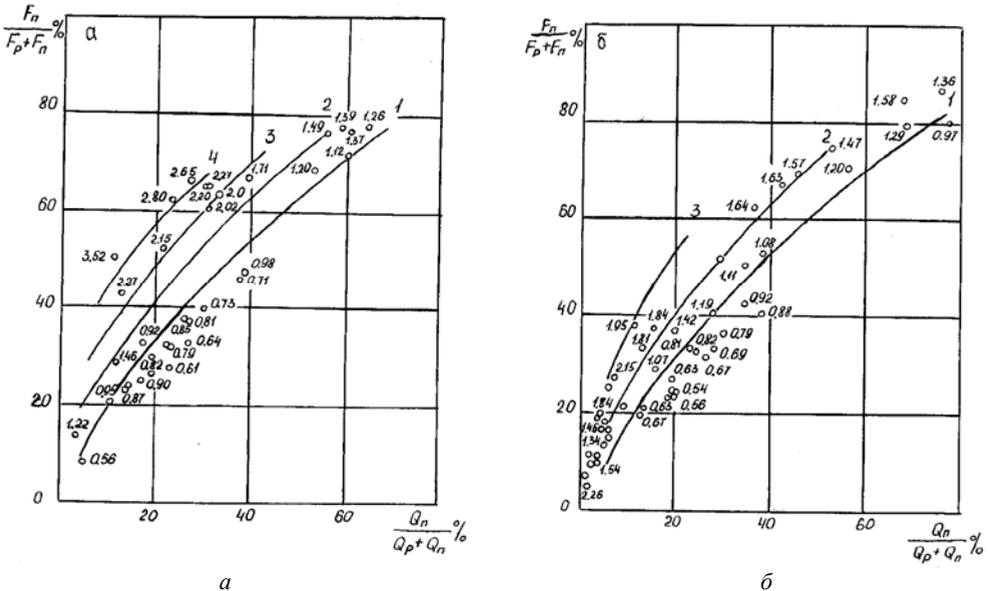


Рис. 2. Кривые $Q_n/(Q_p + Q_n) = f[F_n/(F_p + F_n), n_n/n_p]$.
а - второй тип взаимодействия потоков, б - третий тип

Эти графические зависимости были обоснованы ограниченным объёмом натурной информации, в основном полученной в системе Росгидромета. Зависимость для русловой составляющей была откорректирована для условий параллельности динамических осей потоков (рис. 1).

Данная методика была апробирована на ограниченном объёме натурной информации, что подтвердило её эффективность. Одним из ее недостатков является допущение о том, что имеются сведения о расходах воды и средних скоростях течения при уровнях затопления бровок прирусловых валов (р.б.). При отсутствии этих данных необходимо выполнять расчёты на основе формулы Шези. Таким образом, данная методика также требует дальнейшего совершенствования.

К сожалению, в последние годы и, особенно в период «перестройки», резко снизилось качество натурной информации. Исходя из этого, было решено усовершенствовать второе направление разработки расчётной методики, а именно, основанное на уравнении движения потока с переменным по длине расходом воды. Это направление развивалось на основе лабораторных исследований, в частности, в лаборатории Водных исследований РГГМУ.

Основной их задачей была оценка значимости инерционных членов уравнения (1). Обозначив их $\varepsilon_1 = \frac{\alpha_{K_H} v_H^2 - \alpha_{K_B} v_B^2}{2gL}$, $\varepsilon_2 = \frac{v - v_g}{gF} \frac{Q_H - Q_B}{L}$ и $\varepsilon_3 = \frac{\alpha_B \Delta v}{g\Delta t}$ и решив уравнение (1) относительно средней скорости потока, получим

$$v = C \sqrt{hI \left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)}. \quad (2)$$

Это выражение отличается от формулы Шези на величину множителя $\sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)}$. Поэтому основной задачей исследований являлась не только оценка значимости этих инерционных членов, но и выявление их зависимости от определяющих в основном морфометрических характеристик. Анализ данных [2, 6] позволил установить, что вес третьего инерционного члена ε_3 / I мал, в среднем он составляет доли процента от уклона водной поверхности, при его наибольшей величине в 5 % [3]. В то же время веса первого ε_1 / I и второго ε_2 / I инерционных членов, определенных по данным наблюдений только по двум рекам (Луге, пос. Толмачёво и Пьяне, д. Камкино), соответственно достигают значений 55 и 20%, т.е. являются значимыми. Следовательно, их неучёт при расчётах может приводить к большим погрешностям. Поэтому выявление зависимости этих инерционных членов от определяющих морфометрических характеристик расчётного участка и явилось основной задачей лабораторных исследований.

Для проведения экспериментов была использована малая русловая площадка размерами $2,52 \times 11,0$ м (рис. 3) На ней из бетона была смонтирована модель русла шириной $0,30$ м с односторонней поймой шириной до $2,1$ м.

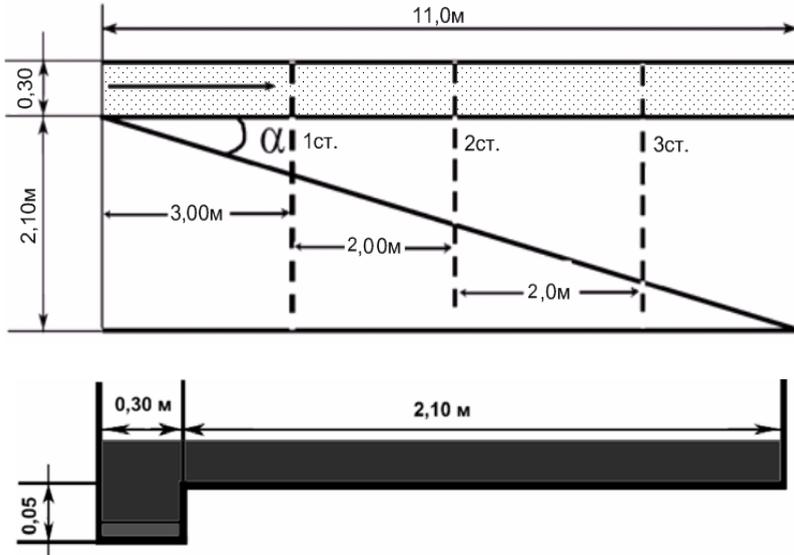


Рис. 3. Схема установки (план и сечение установки)

На этой модели было проведено 2 серии экспериментов при расходящихся и сходящихся динамических осях взаимодействующих потоков под углами $\alpha = 5, 10, 15$ и 20° .

Измерения производились на трёх гидростворах, расположенных на расстоянии 3, 5 и 7 м от входного створа. При этом осуществлялись измерения скоростей потоков на скоростных вертикалях через 1 см по глубине. В русловой части потока было шесть скоростных вертикалей, а на пойме только три. Помимо этого были выполнены измерения расходов донных наносов объёмным способом. Для этого в конце установки была устроена специальная ловушка. Учитывая недостаточную длину установки, была применена разработанная на кафедре гидрометрии методика, основанная на сравнении результатов измерений как в изолированных от поймы русловых потоках, так и при их взаимодействии с потоками поймы. Эта методика, по нашему мнению, позволяла выявить влияние эффекта взаимодействия на гидравлику русловых потоков и расходы донных наносов. Анализ результатов измерений, подтвердив значимое влияние этого эффекта на гидравлику руслового потока, пропускную способность русла и расходы донных наносов, выявил зависимость двух первых инерционных членов от относительных глубин и угла α , вида $\varepsilon_1 / I = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$, и $\varepsilon_2 / I = f(h_p/h_{p,б}, \alpha)$. В частности, для условий расходящихся динамических осей потоков получены близкие к линейным графические зависимости. К сожалению, полу-

читать аналогичные зависимости и для условий схождения динамических осей взаимодействующих потоков не представилось возможным, так как расчётные значения ε_1 / I , а также и значения $\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{I}$ в ряде случаев существенно превышали 100 %.

На основе этих данных были рассчитаны поправочные коэффициенты $\beta = f\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{I}\right)$ к русловой составляющей потока. Значения этих коэффициентов находились в прямой зависимости от относительных глубин и угла α , т.е. $\beta = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$. Как видно на рис. 4, эти зависимости линейные. При этом наибольшее значение коэффициента β при $\alpha = 20^\circ$ составило 1,26. Контрольные расчёты средних скоростей русловых потоков, выполненные на основе натурной информации по пяти рекам, показали, что погрешность расчётов, по сравнению с расчётами по формуле Шези, уменьшилась на 30 %. Эти данные свидетельствуют об эффективности данной методики. Однако необходимо подкрепить её натурными данными.

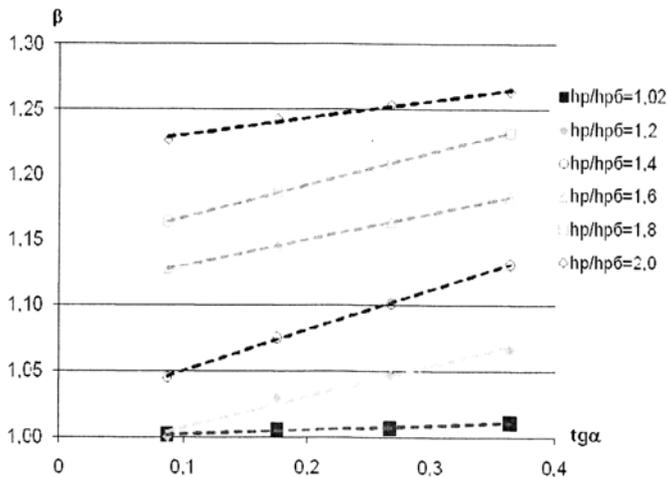


Рис. 4. График зависимости поправочного коэффициента β от относительных глубин и углов α при втором типе взаимодействия потоков

Второй, не менее важной, проблемой является совершенствование методов расчётов стока и расходов донных наносов. Использование надёжных сведений о них способствует совершенствованию методов проектирования ряда гидротехнических сооружений, особенно мостов, водозаборов и водовыпусков, каналов и других сооружений. К сожалению, расходы донных наносов на сети Росгидромета не измеряются. Прекращение их измерений относится к середине 60-х гг. прошлого века из-за несовершенства приборов и методов измерений, при-

водящих к погрешностям, значительно превышающим допустимые пределы и достигающим сотен процентов. Это вызвало интенсивное увеличение числа расчётных методов и формул. Последние, как правило, были разработаны на основе экспериментальных данных, полученных в узких лотках, где соотношение B/h , как правило, было значительно меньше 10, т.е. в условиях пространственного режима [2, 4].

Анализ этих формул и методов выполнялся неоднократно [1] и особенно детально сотрудниками ГГИ под руководством З.Д. Копалиани [5]. Ими, в частности, установлено, что количество формул для расчётов расходов донных наносов в настоящее время свыше 200. Для оценки их качества был использован большой объём, к сожалению, неоднозначной информации. Все расчётные формулы и методы были подразделены на две группы по характеру перемещения наносов. К первой – структурной отнесены формулы, в которых расчёт расходов донных наносов определяется для их донно-грядовой фазы перемещения. По данным авторов [5], хорошие результаты расчётов расходов донных наносов могут быть получены по формуле ГГИ вида $g_b = 0,011h_T v Fr^3 \left[\text{м}^3/\text{с} \right]$, где h_T – высота гряды; v – средняя скорость руслового потока; Fr – число Фруда. Для определения высоты гряд рекомендуются зависимости вида $h = 0,25h_T$ при $h \leq 1$ м и $h_T = 0,2 + 0,1h$ или формулы, разработанные Копалиани [5]. К сожалению, авторы не указывают, какую исходную информацию используют для оценки рекомендуемых методик.

Значительно хуже обстоит дело с формулами для расчётов расходов донных наносов при их бесструктурном способе перемещения, т.е. влечением, качением и сальтацией. Результаты оценки 17, по-видимому, наиболее надёжных формул, иллюстрируется графиком (рис. 5):

Как видно на рисунке, даже рекомендованные авторами формулы (Г.И. Шамова, А.Ф. Кудряшова и др.) дают более-менее близкие к натуре результаты в узком диапазоне изменения переменных. К сожалению, авторы не приводят более детальные сведения об исходной натурной информации и главное, не ясно использованы ли данные о расходах донных наносов при затопленных поймах. В то же время известно, что большинство рек России – равнинные. Наибольшие, и особенно катастрофические, паводки на них проходят при затопленных поймах, когда большое влияние на транспортирующую способность руслового потока оказывает эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Учитывая такое сложное положение с методикой расчётов донных наносов, было принято решение о необходимости выявления влияния эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока с помощью экспериментов на физической модели русла с поймой. Эксперименты проводились на модели русла с односторонней поймой в лаборатории Водных исследований РГГМУ. Описание модели приведено выше (рис. 3). Как при исследовании этого воздействия на гидравлику потоков, так и при воздействии на

транспортирующую способность руслового потока, была использована, разработанная в РГГМУ, методика сравнения. Измерения расходов донных наносов осуществлялись объёмным способом. Для этого в конце модели была установлена специальная ловушка, представляющая собой мешок из капрона.

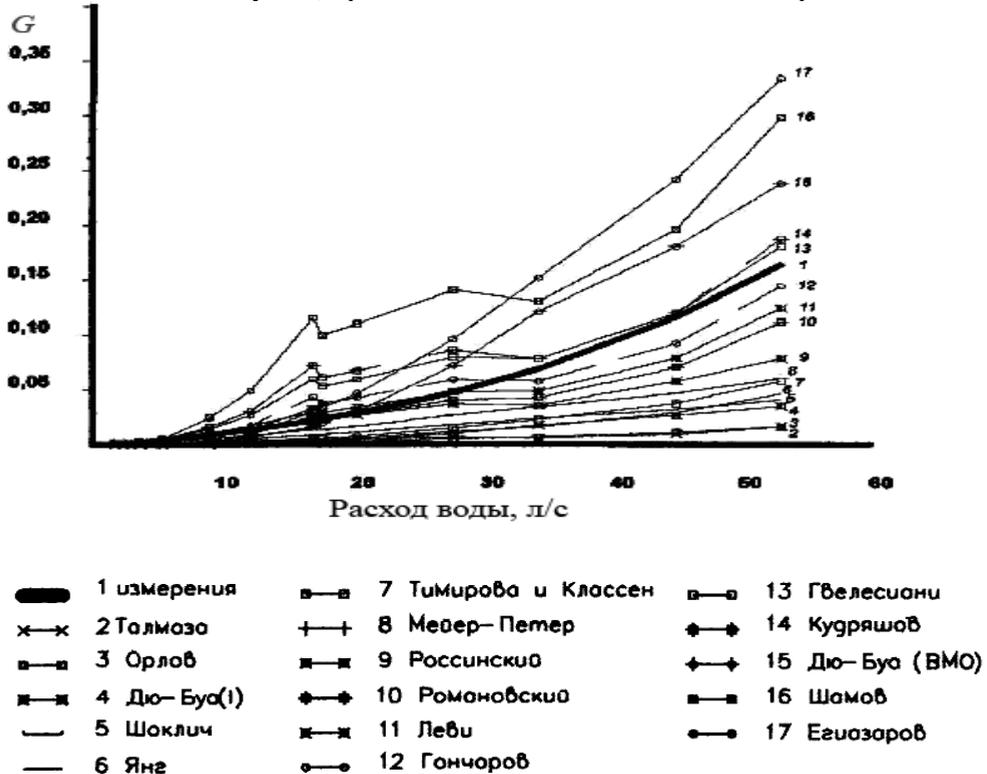


Рис. 5. Расчетные и натурные зависимости $G = f(Q)$
(по различным формулам и экспериментальным данным в гидравлическом лотке)

Анализ результатов экспериментов осуществлялся на основе графических зависимостей в относительных координатах вида $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$, $G_p/G_{p.б.} = f(Q_p/Q_{p.б.})$ и $G_p/G_{p.б.} = f(V_p/V_{p.б.})$ (рис. 6).

Как видно на рисунке, соответствующие кривые над влиянием эффекта взаимодействия потоков отклоняются вправо от аналогичных кривых для изолированного руслового потока, т.е. в сторону значительного увеличения расходов донных наносов, при втором типе взаимодействия потоков. При третьем их типе наблюдаются отклонения соответствующих кривых влево, т.е. в сторону уменьшения. При этом величины таких отклонений расходов наносов от соответствующей кривой, но для изолированного руслового потока, пропорциональны углу α между динамическими осями таких потоков. Всё это наглядно подтверждает принцип саморегулирования в системе «речной поток – русло».

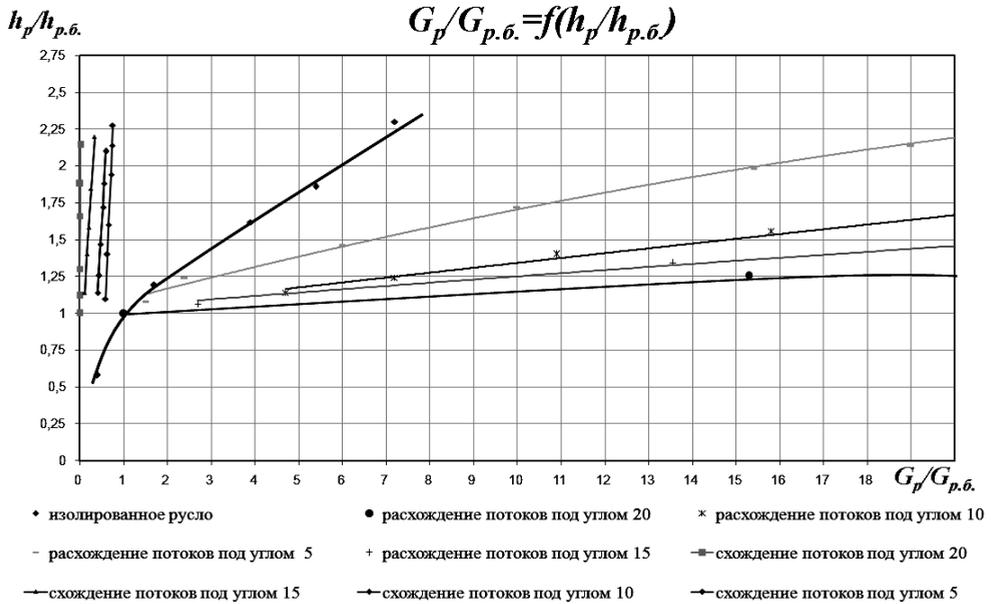


Рис. 6. Зависимости $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ при 2-м и 3-м типах взаимодействия руслового и пойменного потока

Литература

1. Барышников Н.Б. Русловые процессы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 439 с.
2. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 347 с.
3. Барышников Н.Б. Морфометрические характеристики речных русел и пойм / А.О. Пагин, Е.С. Субботина // 25 Межвуз. координац. совещ. – Астрахань, 2010, с. 82-83.
4. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
5. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчёты расхода донных наносов в реках // Сб. работ по гидрологии, № 27. – СПб., 2004, с. 25-40.
6. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Тр. ГГИ, вып. 128, 1965, с. 3-97.