

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДОННЫХ НАНОСОВ

Выполнен анализ методов расчетов расходов донных наносов. Приведены результаты анализа экспериментальных исследований по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при различных его типах на транспортирующую способность наносов русловым потоком. Установлено существенное уменьшение транспортирующей способности руслового потока при его схождении с пойменным потоком и значительное увеличение при его расхождении.

Из-за недоучета стока донных наносов происходит большое количество различных аварий, таких как разрушение мостовых переходов, водозаборов и др. К сожалению, методика их измерений на равнинных реках является несовершенной, что приводит к погрешностям, значительно превышающим допустимые, поэтому на сети Росгидромета наблюдения за стоком донных наносов не производятся. Именно отсутствие надежных приборов и методов измерения расходов донных наносов обусловило разработку большого количества расчетных формул, позволяющих с той или иной степенью точности выполнить их расчеты. В то же время оценка надежности и точности этих формул затруднена из-за низкого качества натурального материала. Интересные результаты расчетов привел на III Всесоюзном гидрологическом съезде инженер В. Е. Любимов [1]. Используя данные натуральных измерений донных наносов, перемещавшихся в безгрядной и донногрядной фазах, и выполнив расчеты по формулам Г. И. Шамова, В. Н. Гончарова и И. И. Леви, он пришел к следующим выводам:

— результаты расчетов расхода наносов по этим формулам иногда дают близкие к натурным данным результаты. При этом формула Шамова уменьшает расход наносов. Формулы Гончарова и Леви для наносов крупностью $0,20 \text{ мм} < k < 0,40 \text{ мм}$ дают вполне удовлетворительные результаты, но по формуле Леви нулевой расход наносов при малых скоростях получается тогда, когда уже наблюдается перемещение наносов, что объясняется несовершенством формулы Леви для расчета критических скоростей;

— для песков крупностью $k < 0,15$ мм формулы Шамова и Леви мало пригодны, а формула Гончарова дает преувеличение.

На данный момент известно свыше 200 формул для расчета стока донных наносов. Поэтому для упрощения анализа многие авторы [2 и др.] разделяют эти формулы на группы на основании определяющего параметра.

В 2004 г. в ГГИ под руководством З. Д. Копалиани [3] был выполнен анализ формул для расчета расходов донных наносов. При этом все формулы были подразделены на девять групп.

По их мнению, наилучшее совпадение расчетных величин с натурными данными и данными измерений в лотке (для бесструктурного транспорта донных наносов) получены по формулам

$$\text{Г. И. Шамова: } g = 0,95 \sqrt{k} V^3/V_k^3 (V - V_k) (k/h)^{0,25} \text{ и}$$

$$\text{Л. Г. Гвелесиани: } g = 12,95 \frac{dv_c}{\left[\lg \frac{12d_{\max} + d}{d} \right]^2} \left(\frac{v^3}{v_c^2} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_c} - 1 \right),$$

$$\text{где } v_c = 3,4 \frac{\lg \left(\frac{8,8h}{d} \right)}{\lg \left(\frac{12d_{\max} + d}{d} \right)} \sqrt{d}.$$

Хорошие результаты также получены по методикам Г. Эйнштейна (1942 г.) и Ф. Лорсена, а для грядового режима движения по формуле Снищенко—Копалиани:

$$q_s = 0,011h_r V Fr^3,$$

$$h_r = 0,25h, \quad h < 1$$

$$h_r = 0,20 + 0,1h, \quad h > 1 \text{ — по Б. Ф. Снищенко,}$$

$$h_r = 0,39d \left(\frac{V}{V_0} \right)^{2,5} Fr^{-3,75} \text{ — по З. Д. Копалиани.}$$

Однако при оценке формул не было учтено запаздывание процесса перестроения гряд от процесса изменения гидравлических характеристик потока. Последнее существенно затрудняет использование натурной информации, так как не ясно, от каких гидравлических характеристик зависят параметры гряд. Следовательно, эту информацию нельзя признать надежной, так как она получена после прохождения паводков. С учетом того, что реки одновременно переносят наносы различной крупности и что роль различных фракций наносов различна в формировании русла и поймы и русловых форм, вопрос о формах движения наносов в процессе их транспортировки (донное влечение, сальтация, взвешивание и донные гряды) приобретает важное значение при решении ряда практических задач [4].

К сожалению, исследованные формулы получены для равномерного движения потока, при котором не происходит изменения расходов воды по длине

потока. Более сложной является проблема транспортирующей способности донных наносов в периоды паводков и половодий при их пропуске по затопленной пойме, когда необходимо учитывать влияние эффекта взаимодействия потоков [5]. Данный эффект был вскрыт в 50-х годах прошлого века [6], несколько позднее была выполнена типизация процессов взаимодействия потоков, в основу которой были положены особенности морфологического строения русла и поймы на участке, расположенном ниже расчетного гидроствора (рис. 1).

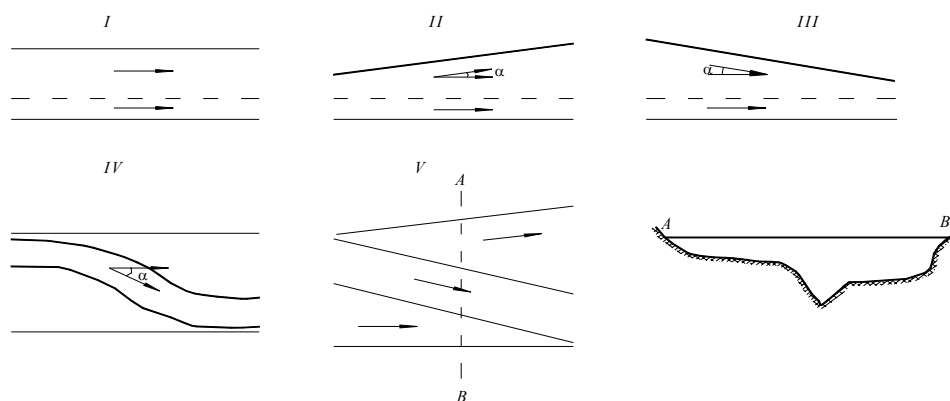


Рис. 1. Типы взаимодействия руслового и пойменных потоков

Установлено, что пойменный поток, как правило, оказывает тормозящее воздействие на русловой поток. При этом транспортирующая способность руслового потока под влиянием пойменного (при параллельности их динамических осей) уменьшается на 10–15%. После выхода воды на пойму при некотором значении h_p расход наносов руслового потока достигает минимума и затем снова возрастает. Это происходит из-за уменьшения пропускной способности руслового потока под влиянием пойменного.

Учитывая, что натурные данные крайне ограничены и, как правило, недоступны, на кафедре гидрометрии РГГМУ в 60-х годах прошлого века были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока [2]. Они выполнялись на малом гидравлическом лотке с переменным уклоном, где было создано русло шириной 0,2 м с поймой шириной 0,2 м и длиной 2,8 м. Глубина русла (до бровки поймы) составляла 0,05 м. Оси русла и поймы на экспериментальной установке были параллельны. Эксперименты выполнялись по разработанной в РГГМУ методике, в соответствии с которой измерения сначала выполнялись в русловом потоке, изолированном от пойменного тонкостенной стеклянной перегородкой, затем эта перегородка снималась и эксперименты выполнялись при взаимодействии потоков. Анализ результатов экспериментов показал, что под влиянием эффекта взаимодействия потоков резко уменьшается транспортирующая способность руслового потока (рис. 2).

Как видно на рис. 2, для условий изоляции руслового потока от пойменного получена однозначная зависимость $G_p = f(h_p)$, аналогичные зависимости при

взаимодействии потоков существенно отклоняются влево от неё, т.е. в сторону уменьшения расходов наносов. Величина этого уменьшения тем больше, чем больше шероховатость поймы. Аналогично расположение кривых зависимостей $G_p = f(Q_p)$. В то же время данные измерений как для изолированного руслового потока, так и при его взаимодействии с пойменным образуют единую зависимость $G_p = f(V_p)$, хотя отклонения точек, соответствующих условиям взаимодействия потоков от этой кривой, немного больше, чем для изолированного руслового потока.

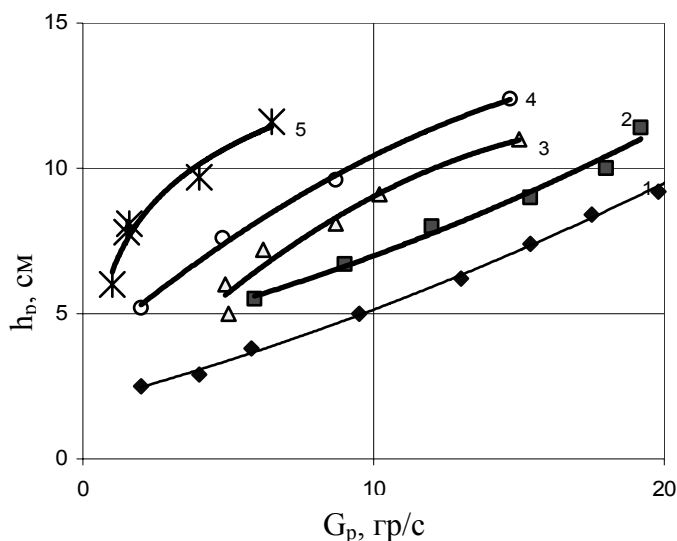


Рис. 2. Зависимость $G_p = f(h_p)$: 1 — изолированное русло; 2, 3, 4, 5 — русло с поймой шероховатостью k_n соответственно 0,5; 1; 2; и 3 см

Учитывая ограниченные размеры установки, в 2003–2004 гг. в РГГМУ были проведены аналогичные эксперименты, но в расширенном диапазоне и в большем по размеру лотке с переменным уклоном. Размеры последнего: длина — 6,0 м и ширина — 0,6 м. Поверхность поймы шириной 0,35 м, и дно русла шириной 0,25 м выполнены из стекла толщиной 4 мм. При этом была применена такая же методика проведения экспериментов, как и в 60-е годы, т. е. эксперименты сначала выполнялись при изоляции руслового и пойменного потоков тонкостенной стеклянной перегородкой, а затем — при взаимодействии потоков. Принципиально новым явилось проведение экспериментов при слиянии руслового и пойменного потоков под углом $\alpha = 20^\circ$. Измерения скоростей и других параметров потоков осуществлялось в трех створах, расположенных на расстоянии 1,5; 2,5 и 3,5 метра от входного створа. На рис. 3 приведены зависимости $G_p = f(h_p)$ как для условий изолированного руслового потока от пойменного, так и при их взаимодействии при параллельности динамических осей потоков и при их схождении под углом $\alpha = 20^\circ$.

Как видно на рис. 3, данные, соответствующие взаимодействующим параллельным потокам, располагаются левее аналогичных, но для изолированного русла. При этом кривая $G_p = f(h_p)$, так же, как и кривая $G_p = f(Q_p)$, располагается значительно левее кривой для условий изолированного русла. При третьем

типе (пойменный поток вторгается в русловый под углом $\alpha = 20^\circ$) его транспортирующая способность уменьшается еще более значительно и соответственно кривые $G_p = f(h_p)$ и $G_p = f(Q_p)$ располагаются значительно левее (рис. 3) аналогичных кривых, соответствующих взаимодействующим потокам, но при параллельности их динамических осей.

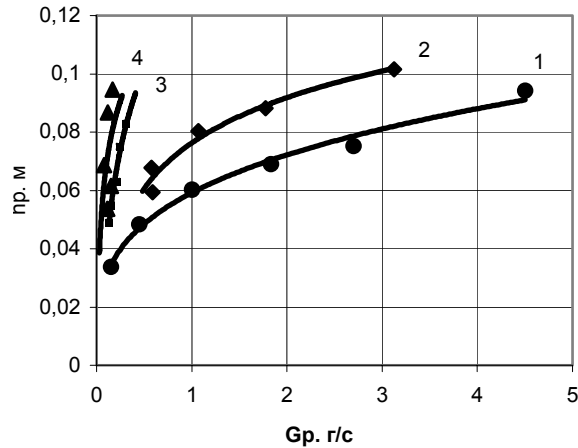


Рис. 3. Зависимость $G_p = f(h_p)$: 1 — изолированное русло; 2 — русло с поймой при параллельности их осей; 3–4 — русло с поймой при сходящихся осях под углом $\alpha = 20^\circ$; 3 — гладкая пойма; 4 — шероховатая пойма

В то же время результаты экспериментов 2003 года имеют и существенные отличия от аналогичных, но проведенных в 60-е годы. Это особенно наглядно иллюстрируется зависимостями $G_p = f(V_p)$ (рис. 4). Как видно на рис. 4, каждому типу взаимодействия потоков соответствует своя кривая зависимости $G_p = f(V_p)$. Последние отклоняются влево от аналогичной кривой для изолированного руслового потока. Величина этого отклонения тем больше, чем больше шероховатость поймы (при параллельности осей потоков) и наибольшая — при схождении осей под углом 20° .

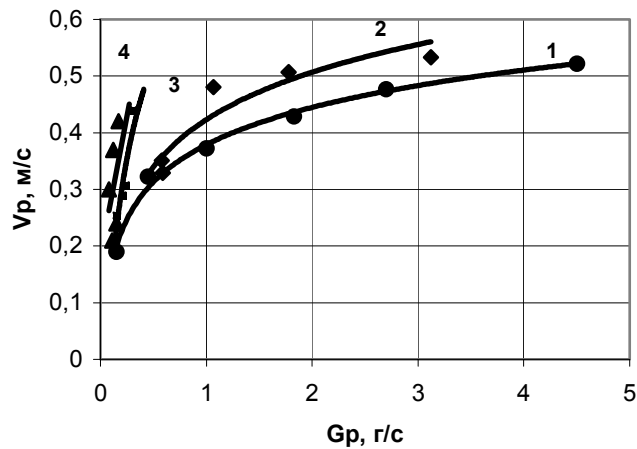


Рис. 4. Зависимость $G_p = f(V_p)$ (Условные обозначения приведены на рис. 3)

Результаты экспериментов позволили установить значительное снижение транспортирующей способности руслового потока при воздействии на него пойменного. Действительно, при параллельности осей потоков транспортирующая способность уменьшилась в 1,5 раза, а при схождении потоков под углом 20° — в 15 раз. При шероховатой пойме и сходящихся потоках транспортирующая способность уменьшилась в 22 раза.

Эксперименты прошлых лет проводились на установках малых размеров, где существенным было влияние эффекта пространственности, да и длина установки (2,8 м и 6,0 м) была недостаточной для исследования процессов взаимодействия потоков. Для того чтобы как-то уменьшить влияние этих недостатков, было решено провести экспериментальные исследования на моделях больших размеров. Для этих целей был использован лоток длиной 11 м, в котором была смонтирована модель русла шириной 0,30 м и высотой 0,05 м, с поймой шириной 2,10 м (рис. 5). Модель была сделана из бетона. При этом русло и пойма имели уклон в 1%. Боковые стенки русла были выложены стеклом толщиной 4 мм, а дно выполнено из бетона.

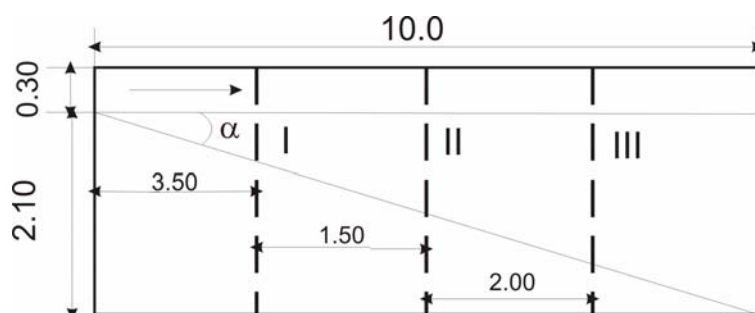


Рис. 5. Схема установки, где $\alpha = 20^\circ$; I — створ находящийся в 3,5 м от входного створа, II — створ, находящийся в 5 м от входного створа, III — створ, находящийся в 7 м от входного створа

Входная часть установки снабжена успокоителем, служащим для гашения энергии. В конце лотка устанавливают жалюзи для регулировки гидравлического режима потока, а также пескоулавливающее устройство, представляющее собой деревянный каркас с прикрепленной к нему ловушкой

При проведении экспериментов применялась методика, разработанная в РГГМУ. Первоначально измерения проводились в русловом потоке, изолированном от пойменного стеклянной перегородкой толщиной 4 мм, затем перегородка снималась, и измерения проводились в русловом потоке, взаимодействующем с пойменным потоком. Новым в данной работе являлись измерения гидравлических характеристик наносов и расходов наносов при расхождении динамических осей потоков под углом в 20° . Все измерения проводились при уклонах дна установки в 1%.

В процессе экспериментов осуществлялись измерения уровней и глубин потока с помощью шпигел-маштаба, скоростей потока — микровертушками, расходов воды — методом скорость-площадь и с помощью тонкостенного треугольного, предварительно протарированного водослива с углом 90° . Все изме-

рения проводились по всей амплитуде уровней через один сантиметр, на трёх створах. На каждом створе назначалось по пять вертикалей в русловой части потока и от одной до пяти вертикалей в пойменной (в зависимости от её ширины). Измерения расходов наносов осуществлялись объёмным методом. В процессе проведения экспериментов проводился отбор проб для гранулометрического анализа.

В результате экспериментов были получены данные о расходах воды, скоростях течения и расходах наносов, на основе которых были построены зависимости $G_p/G_{p\delta} = f(Q_p/Q_{p\delta})$; $G_p/G_{p\delta} = f(h_p/h_{p\delta})$ и $G_p/G_{p\delta} = f(V_p/V_{p\delta})$ — (рис. 6, 7, 8).

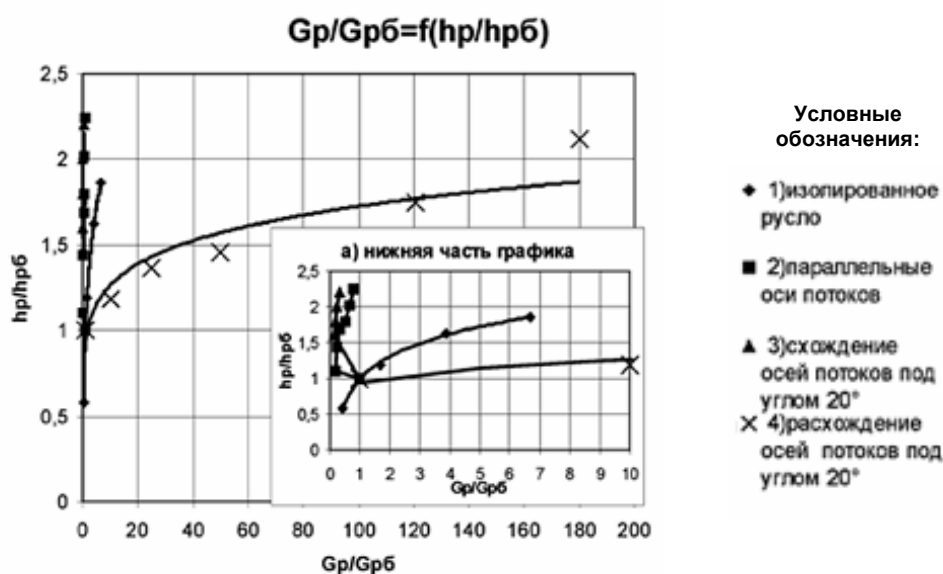


Рис. 6. Зависимость $G_p/G_{p\delta} = f(h_p/h_{p\delta})$: 1 — русловой поток, изолированный от пойменного; 2 — русловой поток, взаимодействующий с пойменным; 3 — русловой поток, взаимодействующий с пойменным (при схождении осей потоков под углом 20°); 4 — русловой поток, взаимодействующий с пойменным (при расхождении осей потоков под углом 20°)

Как видно на рис. 6, кривая зависимости $G_p/G_{p\delta} = f(h_p/h_{p\delta})$ для изолированного руслового потока является однозначной. Отклонение исходной информации от расчетной кривой не превышает 5%. Однако, как и в экспериментах прошлых лет, кривые, полученные при условии взаимодействия потоков, существенно отклоняются от расчетной кривой изолированного русла. Они образуют самостоятельные кривые $G_p/G_{p\delta} = f(h_p/h_{p\delta})$ для условий параллельности динамических осей взаимодействующих потоков и при их схождении под углом $\alpha = 20^\circ$. Новым в данных экспериментах было то, что они впервые проводились при расхождении динамических осей потоков под углом 20° , что соответствует второму типу их взаимодействия.

При расхождении динамических осей руслового и пойменного потоков (рис. 6) транспортирующая способность руслового потока увеличивается в сто и более раз. Аналогичный вид имеет зависимость $G_p/G_{p\delta} = f(Q_p/Q_{p\delta})$ (рис. 7).

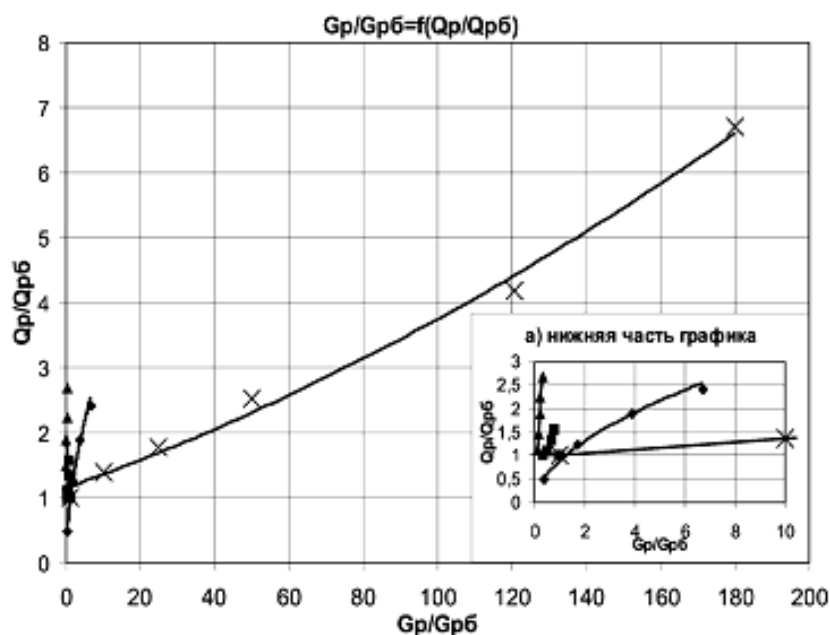


Рис. 7. Зависимость $G_p/G_{p\delta} = f(Q_p/Q_{p\delta})$
(условные обозначения — как на рис. 6)

Анализ экспериментальных данных, выполненных на установках больших размеров, подтверждает выводы о влиянии эффекта взаимодействия потоков на их транспортирующую способность, полученные еще в 60-х годах. Влияние этого эффекта значительно увеличивается при схождении и расхождении их динамических осей и зависит от глубины затопления русла и поймы и от уклона водной поверхности.

В природных условиях расширения пойм обычно чередуются с их сужением. При этом происходит смена типов взаимодействия потоков, сопровождаемая значительным изменением транспортирующей способности руслового потока. Лабораторные эксперименты существенно отличаются от природных условий, так как они обычно выполняются на идеализированных моделях при стационарном режиме. Поэтому в лабораторных условиях можно наблюдать только отдельные фрагменты формирования пропуска паводка, а полный цикл при подъёме и спаде уровня можно наблюдать только в природных условиях.

При взаимодействии потоков, при расхождении их осей скорости руслового потока при выходе воды на пойму имели значения более 1 м/с. При этом наносы начинали смываться со дна русла, и при их постоянной подаче в русле стали формироваться гряды. В створе, расположенном в пяти метрах от входа, скорости потока существенно уменьшились из-за того, что значительная часть руслового потока поступала на пойму. Это сопровождается уменьшением уклонов водной поверхности по длине установки, что привело к интенсивному отложению наносов в русле (т. е. к формированию перекатов) и перемещению значительной их части на пойму.

Вид кривых зависимостей $G_p/G_{p\delta} = f(V_p/V_{p\delta})$ (рис. 8) близок к виду кривых $G_p/G_{p\delta} = f(Q_p/Q_{p\delta})$ и $G_p/G_{p\delta} = f(h_p/h_{p\delta})$.

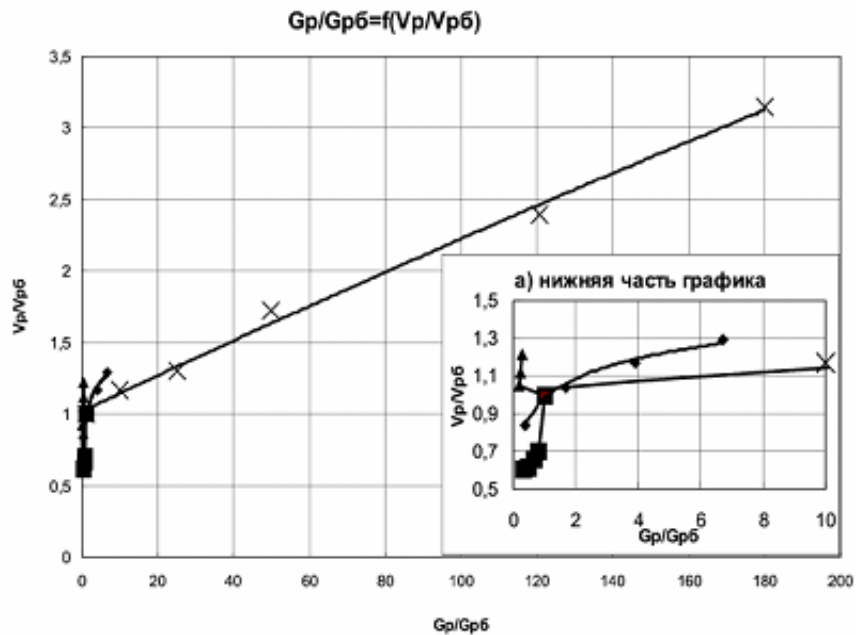


Рис. 8. Зависимость $G_p/G_{p\delta} = f(V_p/V_{p\delta})$
(условные обозначения — как на рис. 6)

Анализ экспериментальных данных подтверждает концепцию РГГМУ о существенном увеличении транспортирующей способности руслового потока под воздействием пойменного потока при втором типе их взаимодействия. По нашему мнению, основной причиной изменения транспортирующей способности руслового потока являются уклоны водной поверхности. Действительно, практически все формулы для расчета транспортирующей способности потока разработаны для условий равномерного движения. При взаимодействии же потоков движение руслового потока является неравномерным и с переменным по длине расходом воды. В частности, при третьем и втором типах взаимодействия под воздействием пойменного потока движение руслового потока является четко выраженным неравномерным.

Экспериментальные исследования влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока в настоящее время продолжают. Их задачей является оценка влияния этого эффекта на транспортирующую способность руслового потока при различных типах взаимодействия на моделях большего размера. В частности, выявление этого эффекта в периоды подъема уровней, когда наблюдается наибольший сток наносов, и в периоды их спада. При спаде уровней пойменный поток, тормозя русловой, резко уменьшает его транспортирующую способность.

В заключение следует отметить основные результаты работы:

— впервые экспериментальным методом вскрыт механизм воздействия пойменного потока на транспортирующую способность руслового при расхождении их динамических осей под углом 20° . Это воздействие тем больше, чем больше глубина затопления и шероховатость поймы. Величина увеличения расхода донных наносов в русловом потоке может достигать 100% и более. Этот

вывод имеет большое практическое значение при подсчете стока донных наносов в периоды подъема уровней при пропуске паводков и половодий по затопленным поймам;

— установлено, что при схождении динамических осей взаимодействия потоков, в частности под углом $\alpha = 20^\circ$, наблюдается резкое уменьшение транспортирующей способности руслового потока (в десятки раз). Это совместно с данными о резком увеличении транспортирующей способности руслового потока при расхождении динамических осей свидетельствует о процессе саморегулирования в системе речной поток — русло. Действительно, в период подъема уровней, когда в русло поступает большое количество наносов, система увеличивает транспортирующую способность руслового потока. В период спада уровней, когда количество поступающих в русло наносов мало, система резко снижает транспортирующую способность руслового потока;

— на установке больших размеров экспериментальным методом подтверждены выводы об уменьшении транспортирующей способности руслового потока при его взаимодействии с пойменным при параллельности их динамических осей;

— аналогичные экспериментальные исследования по изучению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортировку наносов в основном русле необходимо провести в натуральных условиях, охватив ими все типы взаимодействия потоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. Л., 1984.
2. Барышников Н. Б., Железняков Г. В., Алтунин В. С. Влияние кинематического эффекта безнапорного потока на транспорт наносов // Движение наносов в открытых руслах. М., 1970.
3. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., 1962.
4. Копалиани З. Д., Смищенко Б. Ф. Оценка стока наносов рек южного склона Кавказского хребта Краснодарского края. СПб., отчет НИР ГГИ, 2002 (биб-ка ГГИ, рукопись).
5. Любимов В. Е. О способах учёта стока донных наносов на реках // Труды III Всесоюзного гидролог. съезда. Л., 1960. Т. 5.
6. Россинский К. И., Дебольский В. К. Речные наносы. М., 1980.

N. Baryshnikov, A. Pagin, E. Poltsina

IMPACT OF INTERACTION OF CHANNEL AND OF FLOODPLAIN FLOWS ON BED LOAD TRANSPORT

Methods for bed load yield computation have been analyzed. The results of the analysis of experimental studies of the effect of interaction between water flows in the channel and in the floodplain (in case of different types of water flows) on sediment transportation by the water flow in channel are given. A great decrease of the channel flow transporting capacity has been established when the channel flow is combined with water flow in the floodplain and its significant increase has been observed when it is separated from the floodplain water flow.