

А.О. Пагин, Т.С. Селина, О.Л. Тимофеева

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО
И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТ НАНОСОВ**

A.O. Pagin, T.S. Selina, O.L. Timofeeva

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE
OF THE EFFECT OF INTERACTION
BETWEEN CHANNEL AND FLOOD FLOWS
ON TRANSPORTATION OF RIVER LOADS**

Проблема транспорта донных наносов в периоды паводков и половодий при их пропуске по затопленной пойме является наиболее сложной на данный момент, когда необходимо учитывать влияние эффекта взаимодействия потоков. Из-за отсутствия и надежности формул стало необходимо изучение данного эффекта при затопленной пойме. Поэтому в РГГМУ было проведено 3 серии экспериментов: измерения производились при изолированной пойме и изолированном русле, при схождении динамических осей руслового и пойменного потоков под углом 20 °, а также при их расхождении под тем же углом. В результате были сделаны выводы, что русловой поток воздействует на пойменный в периоды паводков и половодий, особенно на прохождение донных наносов.

The problem of transport of a bed load during freshets and snow melt floods at their skip on an overflowed bottomland is the most difficult at present when it is necessary to take into account effect of an interaction term of streams. Because of absence and reliability of formulas there was a need for a study of the given effect with an overflowed bottomland. Three series of experiments have been carried out by the RSHU: measurements were made at the isolated bottomland and the isolated race course, at a convergence of dynamic axes streamflow and inundated streams at an angle of 20 °, and also at their divergence under the same angle. Results have been made, that streamflow effects inundated during freshets and snow melt floods, especially transiting of bed loads.

Донные наносы играют важную роль при использовании водных объектов в гидрологической и водохозяйственной деятельности. Так, необходима оценка стока донных наносов при проектировании и строительстве водозаборов, мостовых переходов и т.д. Следует также отметить, что сток донных наносов находится в прямой зависимости от изменения стока воды, в результате чего любое изменение водности приводит не только к изменению стока наносов, но и к изменению русловых процессов.

На данный период времени, на сети Росгидромета, были прекращены измерения расхода донных наносов. Это произошло в результате низкой точности измерений, так как при применении современных методов и приборов погрешности измерений превышали 100 %. Однако при экспедиционных исследова-

дованиях осуществляются измерения расходов донных наносов, но, к сожалению, они не публикуются. Такое положение с расчетом стока донных наносов привело к появлению большого количества различных методов и формул по данной проблеме. В настоящее время имеется более 200 формул для расчета расхода донных наносов. Но как отмечает в своей работе З.Д. Копалиани [Копалиани, 2004], где под его руководством в 2004 г. было исследовано свыше 200 формул, довольно часто формулы используются не по назначению, т.е. формулы, полученные для одного диапазона крупностей, используются совершенно по другому. Очень важной является оценка этих формул на основе количественной натурной информации.

Однако при оценке формул не было учтено запаздывание процесса перемещения 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. Учитывая, что реки одновременно переносят наносы различной крупности и что роль различных фракций наносов различна в формировании русла, поймы и русловых форм, вопрос о формах движения наносов в процессе их транспорта (донное влечение, сальтация, взвешивание и донные гряды) приобретает важное значение при решении ряда практических задач [Барышников, 1984]. Учитывая, что все указанные расчетные выражения основаны на теории плоского потока, применение их для расчета стока наносов в естественных водотоках и особенно на реках с поймой не всегда правомерно. Однако на равнинных реках именно в паводочный период при затопленной пойме проходит до 70 – 90 % годового стока русловых наносов.

Одним из основных недостатков формул является то, что они выведены на основании лабораторных данных, и их не всегда можно использовать для расчетов в натуральных условиях. Более того, эти формулы были получены для условий равномерного движения, когда вода проходит только по руслу, а данные паводочного периода отсутствуют, хотя в этот период наблюдается основной сток донных наносов. Именно в этот период существенное влияние оказывает эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Данный эффект был вскрыт в 50-х годах прошлого века [Барышников, 1984]. Несколько позднее была выполнена типизация процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, в основу которой положены особенности морфологического строения русла и поймы на участке, расположенном ниже расчетного гидроствора. Данная типизация разработана для условий стационарного режима. Установлено [Барышников, 1984, 1988], что при подъеме уровней, когда наблюдается растекание масс руслового потока по пойме, процесс близок ко второму типу взаимодействия потоков. При этом поперечные уклоны водной поверхности направлены от руслового потока к пойменному. На спаде

половодья или паводка наблюдается противоположное явление, т.е. массы пойменного потока поступают в русло, тормозя русловой поток. Поперечные уклоны водной поверхности соответственно направлены в сторону руслового потока.

Учитывая, что основной сток наносов происходит в периоды паводков и половодий, необходимо оценить влияние эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока. К сожалению, эта оценка выполнена недостаточно. Руслу с поймами – частный случай сложносоставных русел, отличительной особенностью которых является наличие в них двух и более потоков, движущихся с различными скоростями параллельно или под различными углами друг к другу. При взаимодействии этих потоков возникают дополнительные сопротивления, существенно изменяющие пропускную способность таких русел.

Так как натурные данные крайне ограничены и, как правило, не доступны, 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 [Барышников, 1984]. 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, а затем при взаимодействии потоков. Анализ результатов экспериментов показал, что под влиянием эффекта взаимодействия потоков резко уменьшается транспортирующая способность руслового потока. Величина этого уменьшения тем больше, чем больше шероховатость поймы. 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.

Учтя ограниченные размеры установки, в 2003 – 2004 гг. в РГГМУ были проведены аналогичные эксперименты на большем по размеру лотке с переменным уклоном и в расширенном диапазоне. 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 потока от пойменного тонкостенной стеклянной перегородкой, а затем при их взаимодействии. Принципиально новым явилось проведение экспериментов при слиянии руслового и пойменного потоков под углом $\alpha = 20^\circ$. Измерения скоростей и других пара-

метров потоков осуществлялось в трех створах, расположенных на расстоянии 1,5; 2,5 и 3,5 м от входного створа. Результаты этих экспериментов позволили подтвердить сведения об уменьшении транспортирующей способности руслового потока под влиянием пойменного при параллельности осей потоков. При третьем типе взаимодействия потоков (пойменный поток вторгается в русловую 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, аналогичных кривых, соответствующих взаимодействующим потокам, но при параллельности их динамических осей.

В то же время результаты экспериментов 2003-го года имеют и существенные отличия от аналогичных, но проведенных в 60-е годы. По данным экспериментов были получены однозначные кривые зависимости $G_p = f(V_p)$ при различных типах потоков.

Анализ экспериментальных данных позволил установить значительное снижение транспортирующей способности руслового потока при воздействии на него пойменного. Действительно, при параллельности осей потоков существенно уменьшилась транспортирующая способность руслового потока. В то же время это уменьшение при схождении потоков под углом 20° и при гладкой пойме значительно больше, чем при параллельности осей потоков.

Учтя малые размеры лотков, было решено провести эксперименты на установке больших размеров. Для этой цели был использован лоток длиной 11 м, в котором была смонтирована из бетона модель русла шириной 0,30 м и высотой 0,05 м, с поймой, шириной 2,10 м. Уклон дна русла и поймы был равен 1 ‰. Боковые стенки русла были выложены стеклом толщиной 4 мм, а дно выполнено из бетона.

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 потоков и расходов наносов при расхождении динамических осей потоков под углом в 20° . Все измерения проводились при уклонах дна установки в 1 ‰.

В результате экспериментов были получены данные о расходах воды, скоростях течения и расходах наносов, на основе которых были построены зависимости $G_p/G_{pб} = f(Q_p/Q_{pб})$; $G_p/G_{pб} = f(h_p/h_{pб})$ и $G_p/G_{pб} = f(V_p/V_{pб})$. Так же было выполнено сравнение экспериментальных данных с аналогичными данными прошлых лет, полученными на установках меньших размеров. [Здесь G , h , V и Q – соответственно расходы донных наносов, глубины, средние скорости и расходы воды руслового потока; индексы $pб$ и p соответственно обозначают, что данные параметры получены в русловом потоке при уровнях затопленной бровки прируслового вала ($pб$) или при более высоких уровнях (p).]

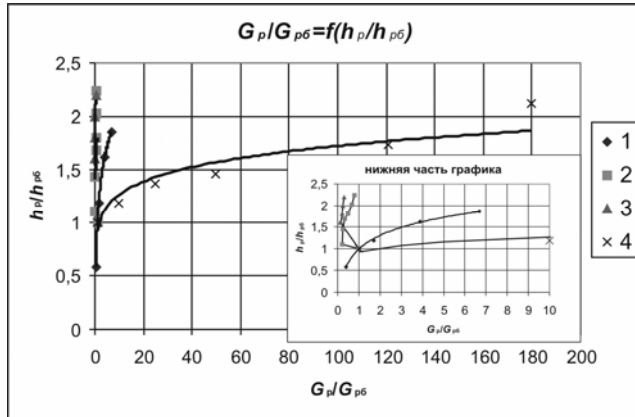


Рис. 1. Зависимость $G_p/G_{p6} = f(h_p/h_{p6})$. 1 – русловой поток, изолированный от пойменного; 2 – русловой поток, взаимодействующий с пойменным; 3 – русловой поток, взаимодействующий с пойменным (при схождении осей потоков под углом 20°); 4 – русловой поток, взаимодействующий с пойменным (при расхождении осей потоков под углом 20°).

Как видно на рис. 1, кривая зависимости $G_p/G_{p6} = f(h_p/h_{p6})$ 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 $G_p/G_{p6} = f(h_p/h_{p6})$ для условий параллельности динамических осей взаимодействующих потоков и при их схождении и расхождении под углом, равным 20° .

Как видно на рис. 2, при расхождении динамических осей руслового и пойменного потоков транспортирующая способность руслового потока увеличивается во много раз. Аналогичный вид имеют зависимости рис. 1, кривая зависимости $G_p/G_{p6} = f(h_p/h_{p6}) = f(Q_p/Q_{p6})$ и $G_p/G_{p6} = f(V_p/V_{p6})$.

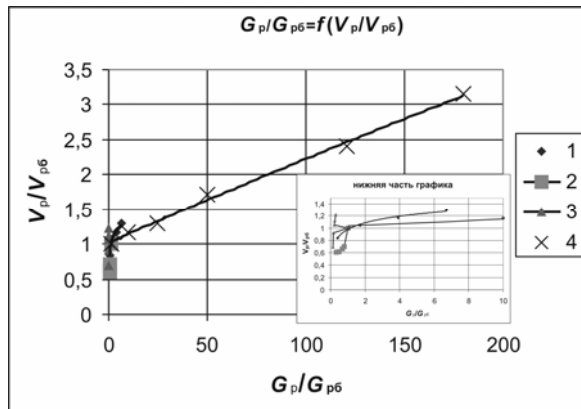


Рис. 2. Зависимость $G_p/G_{p6} = f(V_p/V_{p6})$ (условные обозначения приведены на рис. 1)

Анализ экспериментальных данных, полученных 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 уклона водной поверхности.

При взаимодействии потоков, при расхождении их осей скорости руслового потока при выходе воды на пойму были 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 м от входа, скорости потока существенно уменьшились из-за того, что значительная часть руслового потока поступала на пойму. Это сопровождалось 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. Последние отлагались на пойме или перемещались по ней в донногрядовой фазе.

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, как правило, наблюдаются только отдельные фрагменты формирования пропуска паводка, а полный цикл при подъеме и спаде уровня можно наблюдать только в природных условиях.

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 воздействии же пойменного потока на русловое движение является неравномерным и с переменным по длине расходом воды. В частности, при третьем и втором типах взаимодействия потоков движение руслового потока под воздействием пойменного является четко выраженным неравномерным.

В результате анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- впервые установлен механизм воздействия пойменного потока на транспортирующую способность руслового при расхождении и схождении динамических осей потоков, в частности под углом 20°;

- при расхождении осей потоков данное воздействие увеличивается при увеличении мощности пойменного потока относительно руслового, что приводит к значительному увеличению расхода донных наносов руслового потока. 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 взаимодействующих потоков, в частности под углом $\approx 20^\circ$, наблюдается резкое уменьшение транспортирующей способности руслового потока (в десятки раз);

- полученные данные при схождении и расхождении динамических осей пойменного и руслового потоков свидетельствует о процессе саморегулирования в системе речной поток – русло. Действительно, в период подъема уровней, когда в русловой поток поступает большое количество наносов, система увеличивает его транспортирующую способность. В период спада уровней, когда количество поступающих в русловой поток наносов мало, система резко снижает его транспортирующую способность. Основной причиной изменения транспортирующей способности руслового потока является воздействие эффекта взаимодействия потоков на уклоны водной поверхности, а следовательно, и на средние скорости руслового потока.

Литература

1. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.
2. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 456 с.
3. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.
4. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках. / Сборник работ по гидрологии № 27. – СПб., 2004.