

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 556.535.6:556.536

ПАГИН АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕН-  
НОГО ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТ ДОННЫХ НАНОСОВ

Специальность:

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2008

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

**Научный руководитель:** заслуженный деятель науки РФ,  
доктор географических наук, профессор  
**Барышников Николай Борисович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Арсеньев Герман Семенович**  
  
кандидат географических наук  
**Тихомиров Константин Сергеевич**

**Ведущая организация:** МГУ им. М.В. Ломоносова (лаборатория «Эрозии почв, русловых и устьевых процессов»).

Защита диссертации состоится **11 декабря** 2008 года в 15<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «6» ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук



В.Н. Воробьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Информация о донных наносах является крайне необходимой для проектирования и строительства различных гидротехнических сооружений (мостовых переходов, каналов различного назначения, дамб обвалования и других сооружений), обеспечения судоходства и водохозяйственных мероприятий. В то же время расходы донных наносов на сети Росгидромета не измеряются, а данные специальных наблюдений, в частности, за грядовым режимом перемещения наносов, как правило, не публикуются.

Анализ около 200 формул для расчета транспортирующей способности потока показал, что они в большинстве своем получены на основе данных экспериментов, выполненных в лотках прямоугольного сечения, и являются эффективными для естественных водотоков только в узком диапазоне изменений гидравлических характеристик речных потоков и морфологических характеристик русел. Погрешности расчетов по ним часто выходят за допустимые пределы.

Известно, что основной сток донных наносов происходит в периоды высоких паводков и половодий. Учитывая, что на территории России большинство рек относятся к равнинному типу, высокие паводки и половодья обычно проходят по затопленным поймам, при этом наблюдается эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Последний, в основном трудами отечественных ученых (Г.В. Железняков, В.Н. Гончаров и др.), был вскрыт в середине 50-х годов прошлого века, но до настоящего времени не выполнена оценка влияния этого эффекта на транспортирующую способность руслового потока. Решение этой проблемы, имеющей большое научное и практическое значение, является основной целью данной работы.

Цели и задачи исследования. Вскрытие закономерностей воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов русловым потоком. Оценка возможности применения существующих формул и методов для расчетов расходов донных наносов в периоды пропуска паводков и половодий по затопленным поймам.

Разработка методики учета эффекта взаимодействия руслового и пойменных потоков при расчетах расходов донных наносов. Анализ результатов натурных исследований по изучению движения наносов.

Методика исследования и исходные материалы. Для решения поставленных задач в лаборатории Водных исследований при кафедре гидрометрии, РГГМУ была смонтирована жесткая модель прямоугольного русла с поймой. На этой модели проводились эксперименты по изучению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов.

Эксперименты проводились по разработанной в РГГМУ методике. Суть этой методики заключается в сравнении результатов измерений полученных как в изолированном от пойменного русловом потоке, так и при взаимодействии потоков. Это позволяет выявить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков не только на гидравлические характеристики руслового потока, но и на его транспортирующую спо-

способность. Эксперименты выполнялись при расхождении динамических осей взаимодействующих потоков под углами равными  $5^0$ ,  $10^0$ ,  $15^0$ ,  $20^0$ .

Научная новизна и практическая значимость. Впервые экспериментальным методом был вскрыт механизм воздействия пойменного потока на транспортирующую способность руслового при расхождении их динамических осей.

Определено превалирующее влияние особенностей морфологического строения русла и поймы на расчетном участке на транспортирующую способность руслового потока при пропуске высоких паводков и половодий по затопленной пойме.

Установлено, что во всех исследованных в работе формулах для расчета расходов донных наносов не учитывается влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Рекомендовано введение в расчетные формулы поправочных коэффициентов, основанных на учете этого эффекта с помощью угла между динамическими осями взаимодействующих потоков, а также глубин затопления и шероховатости пойм.

Выполненные исследования позволяют уточнить величину стока наносов в паводочный период.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 5 и 6 – ом семинарах молодых ученых ВУЗов, объединяемых Советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов; на 10-ом международном симпозиуме по речным наносам в МГУ им. М.В. Ломоносова; на XXX Пленуме Геоморфологической комиссии РАН в СПбГУ; на третьем Украинско-польско-русском семинаре по проблеме эрозионно - аккумулятивных процессов в речных системах, в Львовском государственном университете; на итоговых сессиях ученого Совета РГГМУ; на XX (г. Ульяновск), XXI (г. Чебоксары), XXII (г. Новочеркасск) и XXIII (г. Калуга) пленарных межвузовских координационных совещаниях по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов; на межвузовской конференции факультета географии РГПУ им. А.И. Герцена (LX Герценовские чтения); на Всероссийском конкурсе по естественным наукам учащейся молодежи высших учебных заведений Российской Федерации в г. Саратове.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 130 источников и 5 приложений. Работа изложена на 158 страницах текста, включая 27 рисунков и 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается актуальность темы, а также основные цели и задачи диссертации.

В первой главе изложено состояние проблемы формирования и движения донных наносов. Рассмотрены формы транспорта наносов, выявлено распределение скоростей, уклонов водной поверхности и крупности донных отложений вдоль гряды.

Предварительный анализ показал, что основными факторами, определяющими параметры и форму перемещения гряд являются диаметр частиц, глубины и уклоны водной поверхности.

Во второй главе выполнен анализ формул для расчетов расходов донных наносов. Существующие методы измерения расходов донных наносов несовершенны, поэтому, из-за низкой точности получаемой информации, на сети Росгидромета измерения этих расходов не производятся. Большинство формул для расчетов расходов наносов основано на лабораторных данных и имеет ограниченный диапазон применения.

Разработка методики расчета расходов донных наносов осуществлялась на основе трех подходов: 1) динамического, изучающего силы, действующие на частицу, находящуюся на дне потока (В.Н. Гончаров, Г.И. Шамов, А. Шоклич, и др.); 2) статистического, изучающего вероятность срыва и перемещения донной частицы (Г.А. Эйнштейн, М.А. Великанов, В.К. Дебольский и др.); 3) методом анализа размерностей (И. В. Егизаров и др.), этот подход фактически является вспомогательным и обычно используется только для анализа и систематизации экспериментальных данных.

Существует около 200 формул для расчета расходов донных наносов. Для упрощения их анализа Н.Б. Барышников разделил все эти формулы и методы на четыре группы. В основу деления он положил определяющие гидравлические параметры. Фундаментальные исследования ГГИ, выполненные под руководством З.Д. Копалиани и посвященные оценке эффективности формул для расчетов расходов донных наносов показали, что большинство из них применимы в узком диапазоне изменения гидравлических характеристик потоков и морфометрических характеристик русел. Важным моментом этой работы явилось деление методов расчетов на две группы в зависимости от характера перемещения наносов: бесструктурные и структурные. Для последнего, обеспеченного более надежной лабораторной и натурной информацией, эффективность расчетных методик более высокая и особенно, методика ГГИ (З.Д. Копалиани и Б.Ф. Смищенко).

Анализ основных формул для расчета расходов наносов, полученных различными способами, показывает, что большинство из них может быть приведено к одному виду  $g_B = f(n/n_k - 1)$ , что свидетельствует о достоверности предпосылок, положенных в основу их вывода. Также следует отметить, что к результатам оценки эффективности расчетных формул необходимо подходить с некоторой осторожностью, так как в натуральных данных не устранен эффект запаздывания перемещения донных наносов от изменения гидравлических характеристик потоков.

Анализ основных причин неудовлетворительного состояния проблемы расчетов расходов донных наносов неоднократно выполнялся различными авторами (В.Е. Любимов, З.Д. Копалиани и др.).

Так, З.Д. Копалиани отмечает следующие недостатки: многообразие формул для определения критических скоростей; несогласованность терминологии; недостаточный учет структурных форм перемещения донных наносов, являющихся основной формой транспорта донных наносов в реках при полной подвижности руслового материала; низкая точность и ограниченность натуральных измерений, отсутствие измерений на горных реках при высоких расходах воды; при оценке стока донных наносов не учитываются тип руслового процесса, величина реки и ее гидрологический режим (фазы водности, неустановившийся режим и характеристики стока воды).

В третьей главе рассмотрено влияние пойменных потоков на пропускную способность и сопротивления речных русел.

В 1947–50 г. Г.В. Железняков, выполнивший анализ экспериментальных данных по изучению взаимодействия руслового и пойменных потоков, полученных на прямолинейной модели русла с двухсторонней поймой, обнаружил существенное уменьшение средних и поверхностных скоростей руслового потока под влиянием пойменного, впоследствии названное им кинематическим эффектом взаимодействия безнапорного руслового и пойменного потоков.

Последующие исследования этой проблемы в натуральных условиях, в частности, выполненные в ГГИ под руководством Д.Е. Скородумова и позднее И.Ф. Карасева, позволили установить определяющее влияние особенностей морфологического строения пойм на расчетном участке на гидравлику потоков в руслах с поймами.

Теоретическое объяснение кинематического эффекта выполнено В.Н. Гончаровым, который отметил, что на границе раздела параллельных взаимодействующих потоков возникает вертикально расположенная волновая поверхность. При увеличении градиента скоростей взаимодействующих потоков волна опрокидывается и с её вершины отделяются вихри, которые в силу эффекта эжекции втягиваются в более быстрый русловой поток. На образование и перемещение в поперечном направлении таких вихрей затрачивается энергия потока, что приводит к уменьшению пропускной способности русла, т. е. расход воды из-за этого эффекта становится меньше, чем в таком же, но изолированном русле при тех же глубинах.

В природных условиях параллельные потоки являются редким исключением. Обычно наблюдаются сходящиеся, расходящиеся или пересекающиеся русловые и пойменные потоки. Процесс взаимодействия потоков на основе данных натуральных наблюдений на сети Росгидромета был исследован Н.Б. Барышниковым, предложившим их типизацию.

В основу типизации было положено взаимное расположение динамических осей взаимодействующих потоков. На этой основе для условий стационарной задачи выделено пять типов для участка расположенного ниже расчетного створа.

Анализ натуральных данных Росгидромета, а также других научных и производственных организаций (ГГИ, Гидропроекта и др.) позволил Н.Б. Барышникову, разработать методику расчёта пропускной способности пойменных русел, учитывающую эффект взаимодействия руслового и пойменных потоков и основанную на графических зависимостях вида:

$$v_p / v_{p.б.} = f(h_p / h_{p.б.}, a) - \text{для русловой составляющей}$$

$$Q_{II} / (Q_p + Q_{II}) = f\left(\frac{F_{II}}{F_p + F_{II}}, \frac{n_{II}}{n_p}, a\right) - \text{для пойменной.}$$

Результаты расчетов по данной методике значительно лучше, чем по методике, основанной на использовании формулы Шези.

Здесь же рассмотрены распространенные классификации пойм. Наиболее обоснованными из них следует признать классификации, разработанные в ГГИ И.В. Поповым и в МГУ – Н.И. Маккавеевым и Р.С. Чаловым.

В четвертой главе приведены основные результаты исследований по воздействию эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов русловым потоком, здесь же изложены методики проведения экспериментов и учета эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчетах расходов донных наносов.

К сожалению, натурные исследования крайне ограничены. Особенно интересными являются результаты паводочных работ, проведенных сотрудниками ГГИ З.М. Великановой и Н.А. Ярных на р. Оби у г. Барнаула и результаты исследований Ю.М. Корчохи и Б.Ф. Сنيщенко, по данным наблюдений на р.Полометь.

Так, на р.Оби производились измерения как жидкого стока, так и стока донных наносов в процессе пропуска паводка по затопленному пойменному массиву. Измерениями на излучине р.Оби было установлено, что в период подъема уровней при пересечении руслового и пойменных потоков под углом примерно равным  $90^0$ , в русле образовалась водоворотная зона, в результате русло реки, было полностью заполнено донными наносами. Далее, последние, через прорывы в прирусловых валах стали поступать на пойменный массив. При этом была установлена четкая сортировка наносов по крупности. Наиболее крупные частицы осаждались в непосредственной близости от прорыв. По мере передвижения в глубь массива крупность осевших частиц уменьшалась.

Учитывая ограниченность натуральных данных по этой проблеме, а так же высокую стоимость и неопределенность во времени процессов пропусков паводков и половодий по затопленным поймам, за основу был принят метод физического моделирования.

Первые экспериментальные исследования по данной проблеме были проведены в лаборатории ЛГМИ (теперь РГГМУ) в начале 60-х годов прошлого столетия под руководством Н.Б. Барышникова. Эксперименты выполнялись в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном, длиной 2,8 м и шириной 0,4 м. В этом лотке была смонтирована модель русла с поймой шириной 0,2м. Глубина русла была 0,05 м. Геометрические оси русла и поймы, а также динамические оси потоков в них были параллельны.

Эксперименты на этой модели проводились по методике, разработанной в РГГМУ, которая заключалась в измерении расходов наносов и других гидравлических параметров руслового потока сначала в условиях его изоляции тонкостенной стеклянной (0,004м) перегородкой от пойменного потока. Затем эта перегородка удалялась, и измерения повторялись при взаимодействии руслового и пойменного потоков. Основным недостатком данной работы явились малые размеры экспериментальной установки. В частности, её относительная ширина  $B/h < 10$ , а это оказывало значительное влияние на трансформацию поля скоростей руслового потока и, что особенно важно, приводило к существенному увеличению донных скоростей при тех же значениях средних скоростей (по сравнению с плоским потоком).

Анализ результатов экспериментов позволил установить, что зависимости расходов донных наносов в русле от глубины ( $G_p = f(H_p)$ ) и от расхода воды ( $G_p = f(Q_p)$ ) под влиянием эффекта взаимодействия потоков отклоняются влево от аналогичных, но в изолированном русловом потоке (рис. 1). Величины этих отклонений тем больше, чем больше шероховатость поймы.

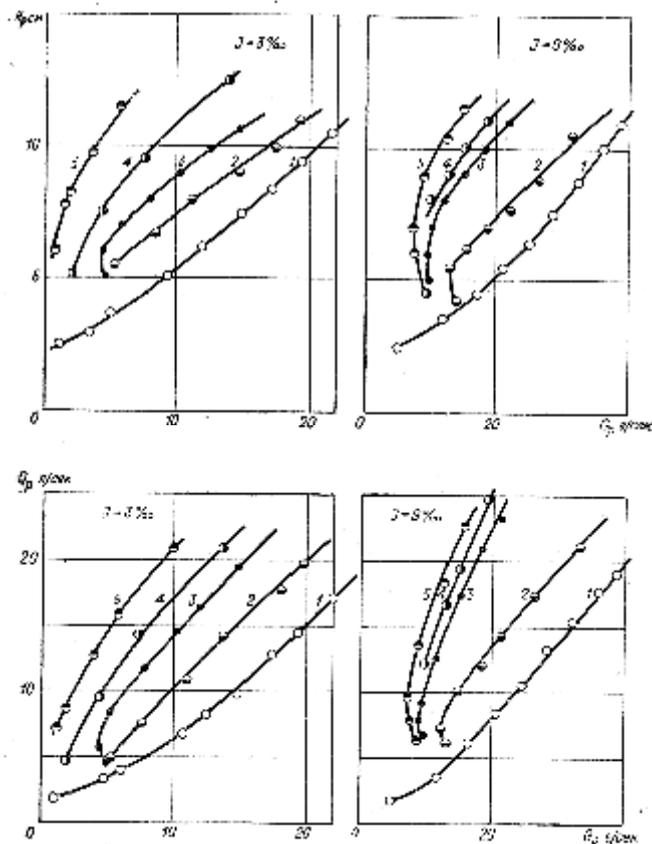


Рисунок 1. Зависимости  $G_p=f(H_p)$  и  $G_p=f(Q_p)$

Здесь  $G_p$ ,  $H_p$  - соответственно расходы донных наносов и глубина руслового потока; индекс  $p$  соответственно обозначает, что данные параметры получены в русловом потоке.

В 2003 г. в РГГМУ были проведены такого же рода эксперименты, но в расширенном диапазоне параметров и в большем по размеру лотке с переменным уклоном.

Размеры установки: длина 6,0 м и ширина 0,6 м. Поверхность поймы, шириной 0,35 м, и русла, шириной 0,25 м, выполнены из стекла, толщиной 4 мм. В этом лотке были смонтированы русло глубиной 0,05 м и пойма.

Принципиально новым явилось проведение экспериментов при слиянии руслового и пойменного потоков под углом  $\alpha=20^\circ$ . На рисунке 2 приведены зависимости  $G_p=f(v_p)$ , как для условий изолированного руслового потока от пойменного, так и при взаимодействии при параллельности динамических осей потоков и при их схождении под углом  $\alpha = 20^\circ$ .

Как видно на рисунке 2, данные соответствующие взаимодействующим параллельным потокам, располагаются левее аналогичных для изолированного русла. При этом кривая  $G_p=f(v_p)$ , так же как кривые  $G_p=f(h_p)$  и  $G_p=f(Q_p)$ , располагаются значительно левее кривой для условий изолированного русла. При третьем типе (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.

Как видно на графике (рис. 2), каждому типу взаимодействия потоков соответствует своя кривая зависимости  $G_p=f(v_p)$ , причем величина этого отклонения тем больше, чем

больше шероховатость поймы (при параллельности осей потоков) и наибольшая при сходимости осей под углом  $20^{\circ}$ .

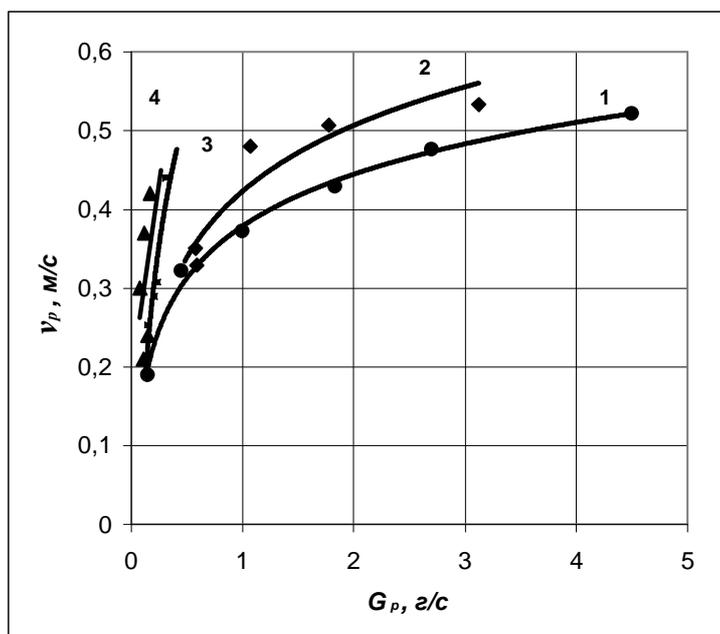


Рисунок 2. Зависимость  $G_p=f(v_p)$

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.

Здесь  $G_p$  и  $v_p$  - соответственно расходы донных наносов и средние скорости руслового потока; индекс  $p$  соответственно обозначают, что данные параметры получены в русловом потоке.

Эксперименты прошлых лет проводились на установках малых размеров, где существенным было влияние недостаточной длины установок (2,8 и 6,0 м), и не рассматривались случаи расхождения динамических осей потоков. Нами были продолжены работы по изучению эффекта взаимодействия руслового и пойменных потоков и его влияния на транспорт наносов.

Экспериментальные исследования выполнялись с целью решения двух задач. Первая - вскрыть особенности эффекта взаимодействия при втором типе в явном виде, т.е. без воздействия дополнительных факторов которые оказывают существенное воздействие на этот процесс в натуральных условиях. Вторая – выявить воздействие эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов русловым потоком.

Следует отметить, что в стационарных условиях этот тип взаимодействия потоков определяется морфологическими особенностями строения русла и поймы на расчётном участке. В условиях же пропуска паводков и половодий по затопленным поймам этот тип взаимодействия потоков соответствует периоду затопления поймы при подъёме уровней. Наиболее сложным при этом типе взаимодействия потоков является трактовка причин резкого увеличения скоростей руслового потока и соответственно пропускной способности русла.

Более сложным является решение второй проблемы, а именно - оценки воздействия эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока. Так проблема воздействия эффекта взаимодействия потоков на расход донных наносов при расходящихся осях потоков практически не исследовалась, хотя основная масса нано-

сов перемещается именно в периоды подъема уровней при пропуске высоких паводков и половодий.

Для реализации поставленной задачи была использована русловая площадка в лаборатории водных исследований РГГМУ с постоянным уклоном, размерами 11,0х2,40 м. На этой площадке из бетона была смонтирована модель русла, шириной 0,30м с поймой переменной шириной от 0 до 2,10м. Глубина русла 0,05м (до отметки бровки прируслового вала).

Дно русла было выложено песком, слоем толщиной 1см. В конце русла был поставлен жёсткий порог, такой же высоты.

Входной бак был снабжён успокоителем, в виде щита, служащим для гашения энергии входа. Выходное отверстие лотка было снабжено жалюзи для регулирования гидравлического режима потока, а также пескоулавливающим устройством, представляющим собой деревянный каркас с прикреплённой к нему ловушкой, выполненной из капроновой ткани. Каркас был снабжён металлическими пластинами, с помощью которых он крепился непосредственно к выходному отверстию лотка.

В процессе работ были выполнены измерения скоростей, уклонов водной поверхности и расходов наносов на моделях с углами равными  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ .

После проведения экспериментов проводился анализ отложения наносов и определение их массы на пойме и в русле, а также наносов, поступивших в «ловушку».

По результатам экспериментов были рассчитаны расходы воды, скорости течения и расходы наносов для всех трех створов. По всем этим данным были построены кривые зависимостей  $G_p/G_{p,\delta} = f(Q_p/Q_{p,\delta}, \alpha)$ ,  $G_p/G_{p,\delta} = f(h_p/h_{p,\delta}, \alpha)$  и  $G_p/G_{p,\delta} = f(v_p/v_{p,\delta}, \alpha)$ . В качестве примера на рисунке 3 приведены зависимости  $G_p/G_{p,\delta} = f(h_p/h_{p,\delta}, \alpha)$ .

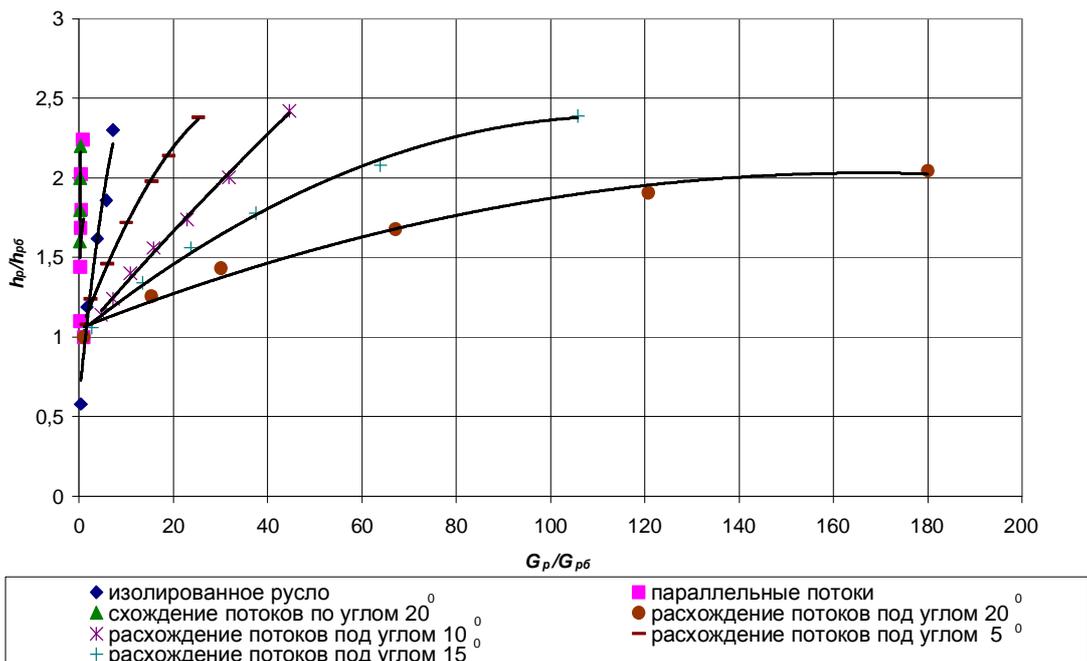


Рисунок 3. Зависимости  $G_p/G_{p,\delta} = f(h_p/h_{p,\delta}, \alpha)$

Здесь  $G$ ,  $h$ ,  $v$  и  $Q$  - соответственно расходы донных наносов, глубины, средние скорости и расходы воды руслового потока; индексы  $p,\delta$  и  $p$  соответственно обозначают, что данные параметры получены в русловом потоке при уровнях затопленной бровки прируслового вала ( $p,\delta$ ) или при более высоких уровнях ( $p$ ).

Как видно на рисунке 3, при параллельности динамических осей потоков, а также при их схождении под углом  $20^\circ$  и расхождении под углами  $5^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $15^\circ$  и  $20^\circ$ , наблюдается резко отличное расположение кривых  $\frac{G_p}{G_{p,\bar{o}}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p,\bar{o}}}\right)$ . Действительно, при расходящихся

осях потоков кривая  $\frac{G_p}{G_{p,\bar{o}}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p,\bar{o}}}\right)$  располагается значительно правее аналогичной кривой для изолированного русла.

По нашему мнению, это объясняется резким изменением уклонов водной поверхности, обусловленных воздействием эффекта взаимодействия потоков.

Анализ экспериментальных данных, полученных на основании проведенных экспериментов, 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.

Также это подтверждается рисунком 4, где представлены зависимости  $G_p = f(a, h)$ , на котором видно, что при увеличении глубины затопления поймы и угла  $\alpha$  расхождения динамических осей потоков происходит увеличение расхода донных наносов.

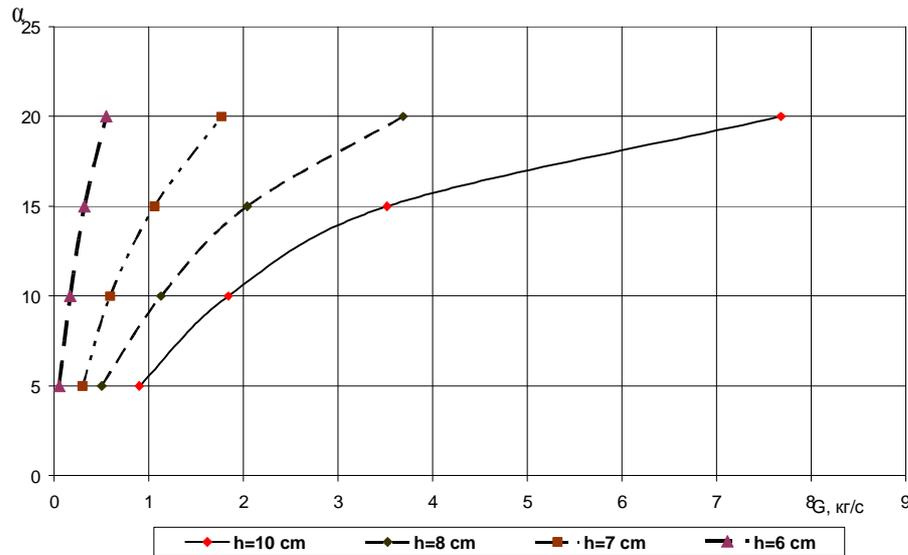


Рисунок 4.  $G_p = f(h_p, a)$

Действительно, при взаимодействии потоков, при расхождении их динамических осей скорости руслового потока при выходе воды на пойму были более 1 м/с. При дальнейшем увеличении скоростей 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 поступила на пойму. Это сопровождалось уменьшением уклонов водной поверхности по длине установки, что привело к интенсивному отложению наносов в русле, (т.е. к формированию переката) и перемещению значительной их части на пойму. Последние отлагались на пойме или перемещались по ней в донногрядовой фазе.

Следовательно, влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов увеличивается при увеличении глубин, уклонов водной поверхности и углов  $\alpha$  (при втором типе взаимодействия руслового и пойменного потоков).

При проведении экспериментов производились измерения объемов наносов, поступающих на пойму, которые составляли от 1/2 до 2/3 всего объема наносов, поступающих в русло на входе на установку. Это объясняется уменьшением расходов воды и скоростей руслового потока по длине и уменьшением уклонов водной поверхности руслового потока. Безусловно, натурные потоки существенно отличаются от лабораторных. Однако лабораторные исследования, несмотря на многие недочеты, позволяют выявить основные закономерности свойственные как лабораторным, так и натурным речным потокам.

Проведенные экспериментальные исследования выявили значительное воздействие эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов. Исходя из этого возникла необходимость учета этого эффекта в различных формулах для расчета расходов донных наносов. Для этого было выбрано 19 наиболее распространенных бесструктурных формул для расчета расходов донных наносов. В частности были рассмотрены формулы: Гвелесиани, Гончарова, Вафина, Мейер-Петера, Доната, Рухадзе, Великанова, Шамова, Леви и других авторов. Расчеты проводились для каждого из измеренных расходов наносов. Анализ результатов расчетов показал, что по всем формулам получены неудовлетворительные результаты. Действительно, погрешности расчетов значительно превышают допустимые пределы, достигая в отдельных случаях тысяч процентов. Наименьшие погрешности получены по формуле Вафина.

Проведенный анализ свидетельствует о необходимости введения в расчетные формулы дополнительного коэффициента, учитывающего эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, в частности, учитываемого с помощью угла  $\alpha$  и глубины затопления поймы.

В заключении сформулированы основные результаты исследований:

- установлено определяющее влияние особенностей морфологического строения русла и особенно поймы не только на гидравлику руслового потока, но и на его транспортирующую способность;
- под воздействием пойменного потока происходит трансформация скоростного поля руслового, что при втором типе взаимодействия потоков приводит не только к увеличению средних скоростей руслового потока, но и к трансформации эпюры их распределения. В частности, по глубине в сторону выравнивания. Следствием этого является увеличение донных скоростей при тех же их средних значениях. В результате транспортирующая способность руслового потока в целом так же возрастает;
- впервые с помощью экспериментов установлено, что при втором типе взаимодействия потоков (расходящиеся динамические оси) ниже расчетного створа наблюдается значительное увеличение уклонов водной поверхности и средних скоростей руслового потока. Следствием этого является резкое увеличение транспортирующей способности руслового потока;
- величина этого увеличения находится в прямой зависимости от глубины затопления поймы, уклона водной поверхности и угла расхождения динамических осей взаимодействующих потоков;

- в натуральных условиях процесс затопления пойм при подъеме уровней воды близок ко второму типу взаимодействия потоков. Именно в этот период в русла рек с их бассейнов поступает наибольшее количество наносов, часто превышающее транспортирующую способность руслового потока. При этом система поток – русло таким образом перестраивает свою структуру, что увеличивает уклоны водной поверхности, а, следовательно, и транспортирующую способность руслового потока. Поступление наносов в речные русла в эти периоды часто превышает последнюю. Избыточное количество наносов откладывается в речном русле и на пойме;
- подтвержден действующий в природных условиях принцип саморегулирования. При затоплении пойм в русла рек поступает большое количество наносов и система, перестраиваясь, увеличивает характеристики руслового потока, а, следовательно, и его транспортирующую способность. При разгрузке пойм наблюдается противоположный процесс;
- все исследованные формулы и методы расчета расходов донных наносов не учитывают эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, что приводит к большим погрешностям расчетов. Величина этих погрешностей превышает допустимые пределы и по некоторым оценкам достигает несколько сотен процентов;
- для совершенствования формул и методов расчетов при их применении к расчетам расходов наносов при пропуске паводков и половодий по затопленным поймам необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие эффект взаимодействия потоков, в частности, с помощью учета угла  $\alpha$ , а также глубин и шероховатости пойм.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Пагин А.О., Немчинов К.В. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт наносов// Эрозийные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. (Материалы V семинара молодых ученых ВУЗов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов).- М.: изд. МГУ, 2004, с. 166 – 167.
2. Пагин А.О. Воздействие эффекта взаимодействия на транспортирующую способность руслового потока // Всероссийский конкурс среди учащейся молодежи высших учебных заведений Российской Федерации на лучшие научные работы по естественным наукам: Тезисы научных работ.- Саратов: изд. Саратовский государственный технический университет, 2004, с.249 – 250.
3. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Саморегулирующая система «поток – русло» и роль наносов в ней// Водные пути и русловые процессы. Межвузовский сборник. - С-Пб.: изд. РГГМУ, 2007, с. 22 – 29.
4. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов//Пойма и пойменные процессы. Межвузовский сборник. - С-Пб.: изд. РГГМУ, 2006, с.73 – 82.
5. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Сток донных наносов при взаимодействия руслового и пойменного потоков// Двадцатое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. - Ульяновск: изд. Студия печати. 2005, с. 105 – 106.
6. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов// Двадцать первое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. - Чебоксары: изд. ЧГУ, 2006, с. 14 – 17.
7. Пагин А.О. Сток донных наносов в периоды паводков и половодий// Эрозийные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. (Материалы VI семинара молодых ученых ВУЗов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов).- М.: изд. МГУ, 2006, с. 168 – 173.
8. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Транспорт наносов в системе русловой поток - русло// Двадцать второе пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов.- Новочеркасск: изд. НГМА, 2007, с. 89 – 91.
9. Солодовник Р.В., Субботина Е.С., Пагин А.О. Русловые карьеры// Двадцать второе пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. - Новочеркасск: изд. НГМА, 2007, с. 209.
10. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Сток наносов в саморегулирующей системе речной поток – русло//Материалы итоговой сессии ученого совета. -С-Пб.: изд. РГГМУ, 2005, с. 4 – 6.
11. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на сток донных наносов// Ерозійно-акумулятивні процеси і річкові системи освоєних регіонів. Збірник наукових праць III українсько-польсько-російського семінару. - Львів: изд. ЛНУ ім. Івана Франка. 2006, с. 288 – 293.
12. Пагин А.О., Селина Т.С., Тимофеева О.Л. Экспериментальные исследования влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт нано-

- сов//Ученые записки №5. Научно-теоретический журнал. Специальный выпуск. – С-Пб.: изд. РГГМУ, 2007, с. 111 - 117.
13. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. BED LOAD AND CHANNEL PROCESSES// Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Symposium on River Sedimentation. August 1-4, Moscow, Russia. Volume II. – Moscow, MGU, 2007, pp. 23 – 28.
  14. Барышников Н.Б., Пагин А.О., Селина Т.С., Демидова Ю.А.. Воздействие особенностей морфологического строения бассейна, поймы и русла на процесс саморегулирования в системе бассейн-речной поток-русло//Отечественная геоморфология: прошлое, настоящее, будущее: Материалы XXX Пленума Геоморфологической комиссии РАН Санкт-Петербург, 15-20 сентября 2008 года. – СПб.:СПбГУ, 2008, с. 187 – 189.
  15. Пагин А.О. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в русле реки//Материалы межвузовской конференции. Факультет географии РГПУ им. А.И. Герцена. География и смежные науки. LX Герценовские чтения. - С-Пб.: изд. ТЕССА, 2007, с. 167 – 169.

#### **В реферируемых журналах:**

1. Пагин А.О., Барышников Н.Б., Немчинов К.В. Воздействие поймы на транспортирующую способность руслового потока// Известия ВНИИГ им.Б.Е. Веденеева. Гидравлика гидротехнических сооружений. Том 245.- С-Пб.: изд. ВНИИГ им. Веденеева, 2006, с. 118 - 128.
2. Пагин А.О., Барышников Н.Б., Польцина Е.В. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность донных наносов// Известия РГПУ им. А.И. Герцена. Естественные и точные науки. Вып. №7(26).- С-Пб.: изд. РГПУ им. А.И. Герцена. 2007, с. 143 - 152.
3. Пагин А.О., Барышников Н.Б., Польцина Е.В., Селина Т.С. Учет кинематического эффекта в методах расчета пропускной способности поймы и русла//Метеорология и гидрология. 2008. № 10, с. 80-85.