

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт»
(ФГБУ «ГГИ»)

На правах рукописи

Петровская Ольга Андреевна

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ С УЧЕТОМ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕК

25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – к.т.н., старший научный сотрудник Копалиани Зураб Дмитриевич

Санкт-Петербург

2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Краткий обзор состояния проблемы транспорта наносов в реках	10
1.1 Основные причины неудовлетворительного состояния проблемы расчета расхода донных наносов в реках	10
1.2 Особенности транспорта донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках. Структурная и бесструктурная формы транспорта донных наносов	11
1.3 Методы разграничения наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные	12
1.4 Гранулометрический состав донных отложений	14
1.5 Начальные условия сдвига донных частиц в песчаных и гравийно-галечных руслах рек	16
1.6 Проблема и методы измерения расхода донных наносов	20
1.7. О методах расчета расхода донных наносов	24
1.8 Анализ сравнений формул расчета характеристик гряд и расхода донных наносов в исследованиях предшествующих авторов	25
1.8.1 Высота гряд	25
1.8.2 Скорость перемещения гряд	26
1.8.3 Расход донных наносов	27
Глава 2. Материалы и методика расчетов	30
2.1 Гидравлическая классификация рек применительно к расчетам расхода донных наносов	30
2.2 Исходные данные	30
2.2.1 Равнинные реки	30
2.2.2 Горно-предгорные реки	36
2.3 Методика апробации формул	48
Глава 3. Расчеты расхода донных наносов при их грядовом движении в равнинных реках	50
3.1 Расчеты высоты песчаных гряд	50
3.2 Расчеты скорости перемещения песчаных гряд	58
3.3 Расчеты расхода донных наносов в равнинных реках по формулам, учитывающим в явном виде грядовую структуру	68
3.4 Расчеты расхода донных наносов в равнинных реках по формулам, не учитывающим в явном виде характеристики гряд	76
Глава 4. Расчеты расхода донных наносов в горно-предгорных реках при грядовой и безгрядовой формах движения руслового материала	84
4.1 Расчеты расхода донных наносов при грядовой форме их перемещения в горно-предгорных реках	84
4.1.1 Расчеты по формулам, учитывающим в явном виде грядовую структуру	84
4.1.2 Расчеты по формулам, не учитывающим в явном виде характеристики гряд	95
4.2 Расчеты расхода донных наносов при бесструктурной форме их перемещения в горно-предгорных реках	101
Глава 5. Локальные зависимости для расчета расхода донных наносов в реках	117

5.1 Расчеты расхода донных наносов в р. Юг.....	120
5.2 Расчеты расхода донных наносов в рр. Тосне, Луге и Шелони.....	132
Заключение	142
Список основных условных обозначений.....	146
Список литературы.....	148
Приложение А. Формулы разных исследователей для расчета высоты гряд, скорости их перемещения и расхода донных наносов.....	158
Приложение Б. Результаты сопоставлений формул расчета расхода донных наносов, выполненных предыдущими исследователями.....	218
Приложение В. Данные измерений характеристик транспорта донных наносов в натуральных и лабораторных условиях	225
Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации баз данных	248

Введение

Учение о речных наносах в его современном виде берет начало с пионерных работ А. Брамса (1753) [92], М.П. Дю Буа (1816) [101], М. Баумгартена (1848) [52], Дж. Фергюссона (1863) [52] и др. За период с середины XVIII в. эта научная дисциплина прошла длительный путь развития и была ориентирована на решение задач, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией земляных каналов, ирригационных систем, водохранилищ ГЭС, обеспечением речного судоходства, борьбой с паводками, рациональным проектированием и эксплуатацией мостовых переходов, речных водозаборов, переходов подводных трубопроводов через реки. В последние десятилетия к этим проблемам добавились задачи мониторинга, охраны и восстановления речных русел и пойм. Решение перечисленных задач требует прежде всего выполнения расчетов расхода и стока донных наносов. Точность расчетов этих величин кардинально влияет на безопасность, надежность и стоимость водохозяйственных мероприятий и на состояние окружающей среды.

В монографии 1990 г. [14] К.В. Гришанин писал: «Сегодня при применении формул расхода влекомых наносов к естественным потокам приходится встречаться с ошибками, исчисляемыми десятками, а иногда и сотнями процентов. Нам остается лишь терпеливо работать над совершенствованием методов расчета. На выполнение этой программы может уйти несколько десятилетий. Но даже когда она будет выполнена, точность расчета расхода наносов останется далекой от точности обычных инженерных расчетов. Большим успехом будет возможность рассчитывать расходы наносов в реках, ошибаясь менее чем в 1,5 раза».

В качестве иллюстрации положения, сложившегося в области расчета расхода и стока донных наносов, приведем прогноз переформирования русла в нижнем бьефе плотины Чепетон на р. Паране согласно математической модели аргентинского исследователя Х. Прендеса (рисунок) [33]. Прендес использовал разные методы расчета расхода наносов для прогноза трансформации русла на участке ниже плотины. Как следует из рисунка, при использовании наиболее популярной на Западе формулы Э. Мейер-Петера величина наибольшего размыва в нижнем бьефе составила 9,2 м, тогда как формула Г.И. Шамова, чаще используемая в СССР и России, дала наибольший размыв всего 1,0 м. Следует также обратить внимание, что используемые в этой математической модели формулы Ф. Ингелунда и Ф.Б. Тоффалетти предназначены для расчета общего расхода наносов, а не для донных наносов, как остальные формулы. Кроме того, формула К.И. Россинского разработана для оценки расхода донных наносов горных рек. Этот пример, помимо неоднозначности существующих формул расхода донных наносов, показывает и некорректность их применения.

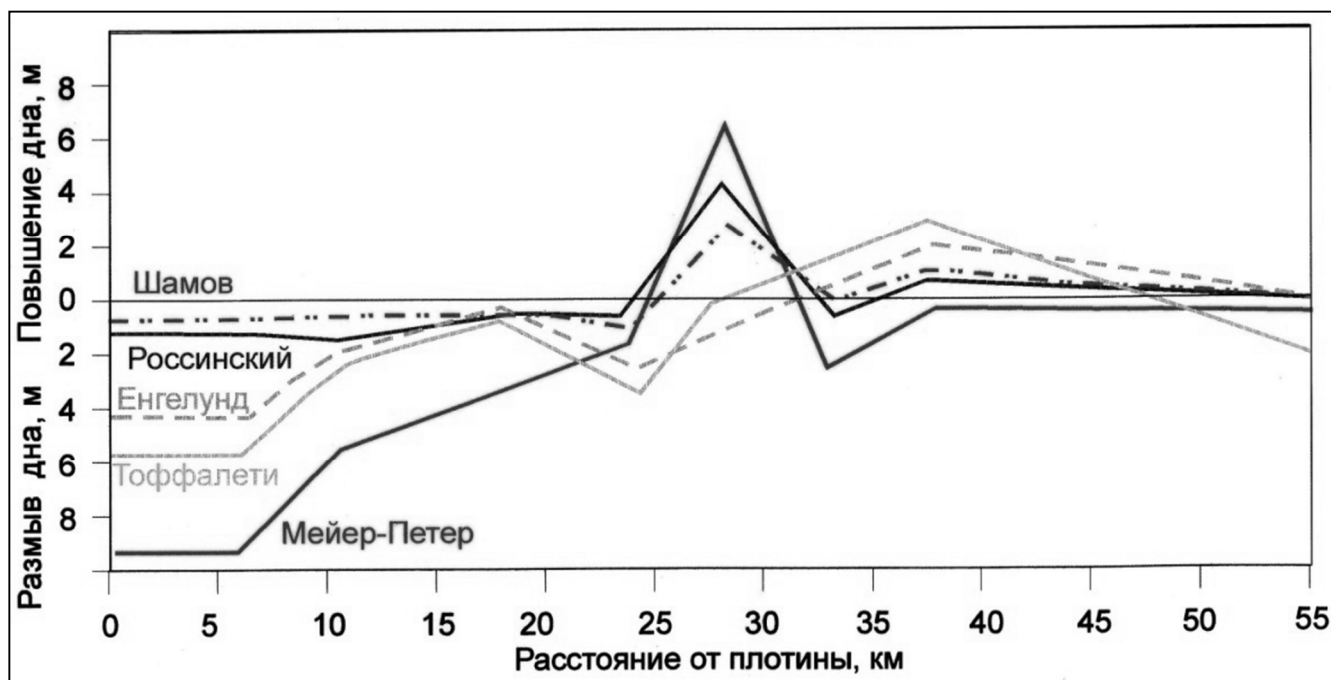


Рисунок – Прогноз переформирования русла в нижнем бьефе плотины Чепетон на р. Паране согласно математической модели Х. Прендеса [33]

За прошедшее с 1990 г. время количество методов расчета расхода донных наносов и их модификаций увеличилось и на сегодня ориентировочно составляет несколько сотен. Однако, можно констатировать, что увеличение их количества не привело к улучшению описанной Гришаниным ситуации. Во-первых, большинство авторов не выполняют проверку своих формул на независимом материале и не дают рекомендаций по возможности их использования за пределами условий, при которых они получены. При этом зачастую формулы расхода донных наносов декларируются и/или воспринимаются, как универсальные. Во-вторых, информация по методам расчета и данным измерений расхода донных наносов не систематизирована. Обобщения результатов исследований в России и за рубежом ведутся фрагментарно, без должного учета всей имеющейся информации и опыта предшественников. Как следствие, водохозяйственные и природоохранные задачи до сих пор решаются неудовлетворительно. Между тем, наблюдающееся активное развитие математических гидродинамических моделей речного потока и русловых деформаций требует максимально объективного расчета степени подвижности донных отложений и расхода донных наносов.

Целью настоящих исследований является научно обоснованная оптимизация методов расчета расхода донных наносов на основе учета гидравлических особенностей водотоков. Данная работа развивает дифференцированный подход к расчетам расхода донных наносов, разрабатываемый в ГГИ с начала 2000-х гг. Он учитывает специфику гидравлических и гидрологических условий транспорта донных наносов в реках разных размеров, расположенных на равнинных и горно-предгорных территориях, особенности морфологии русла, состава

руслового материала и формы движения донных наносов (грядовая или бесструктурная). Для достижения поставленной цели решались следующие основные **задачи**:

- анализ существующих методов измерения расхода донных наносов в полевых и лабораторных условиях и выбор наиболее надежных данных измерений;
- классификация собранных данных по гидравлическим признакам применительно к задаче расчета расхода донных наносов и составление электронной базы данных – основы для дальнейшего исследования;
- анализ и систематизация существующих методов расчета расхода донных наносов с учетом условий их применения;
- апробация расчетных методик на основе данных достоверных измерений, классифицированных по гидравлическим признакам;
- научное обоснование рекомендуемых методов расчета;
- разработка научно-обоснованных рекомендаций по расчету расхода донных наносов для каждой из выделенных гидравлических групп водотоков.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

- впервые разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов;
- созданы три специализированные базы данных натуральных и лабораторных измерений расхода донных наносов, чья достоверность подтверждена критическим анализом;
- получены новые эмпирические формулы: для расчета высоты донных гряд и расхода донных наносов;
- созданы две базы данных отечественных и зарубежных методов расчета расхода донных наносов, основанных на различных методических подходах, в том числе из тех, которые ранее в отечественной научной литературе не рассматривались;
- впервые анализ и апробация большого числа расчетных методов выполнены для каждой гидравлической категории рек и на основе обширных, достоверных данных;
- уточнена технология расчета в области выбора критического значения параметра Шильдса и учета неоднородности гранулометрического состава донных наносов;
- впервые разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету расхода донных наносов для различных видов речных русел и форм движения донных наносов;
- получены локальные зависимости расхода донных наносов для рек Севера и Северо-Запада в створах Гидрометслужбы при минимальной гидравлической информации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов. В результате анализа и апробации на основе обширных, достоверных данных большого числа расчетных методов дано их научное обоснование. Разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету расхода донных наносов дифференцированно для равнинных и горно-предгорных рек с учетом их гидравлических особенностей. Уточнена технология расчета в области выбора критического значения параметра Шильдса и учета неоднородности гранулометрического состава. Созданы специализированные базы данных измерений и методов расчета расхода донных наносов.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертации является гидроморфологическая теория руслового процесса. В ее основе лежит представление о дискретности и иерархичности транспорта наносов. Утверждается, что донные наносы движутся на четырех структурных уровнях: частицы, микроформы-гряды, мезоформы и пойменного массива, – при этом обмена наносами между структурными элементами одного уровня не происходит. В диссертации рассматриваются структурные уровни частицы и микроформы-гряды. Гряда перемещается как целостное морфологическое образование без потери наносов.

В диссертации выполнялись гидравлические и статистические расчеты.

Использованные данные измерений расхода донных наносов взяты из архива ГГИ и литературных источников, кроме экспериментов по р. Мзымте, проведенных А.С. Чеботаревым специально для настоящего исследования.

Положения, выносимые на защиту

- гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов;
- научно обоснованные рекомендации по расчету расхода донных наносов для равнинных и горно-предгорных рек с учетом их гидравлических особенностей;
- новые эмпирические формулы: для расчета высоты донных гряд и расхода донных наносов;
- результаты уточнения технологии расчета расхода донных наносов, в том числе по выбору критического значения параметра Шильдса и учету неоднородности гранулометрического состава;
- локальные зависимости расхода донных наносов для рек Севера и Северо-Запада в створах Гидрометслужбы, полученные при минимальной гидравлической информации.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается достоверностью данных измерений расхода донных наносов, примененных для научного анализа и апробации методов расчета.

Результаты, полученные в рамках данной работы, были использованы при выполнении следующих научных тем ФГБУ «ГГИ»:

- «Разработка мероприятий по стабилизации нового канализированного русла р. Мзымта в районе медиа-деревни (пос. Эсто-Садок) на основе лабораторных исследований гидравлических условий прохождения паводков 1%-ной обеспеченности» (2012 г.);
- «Формирование заторов льда в узле слияния рек Сухона-Юг-Малая Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг» (2014 г.);
- «Исследование водного режима и русловых процессов рек Тосна и Луга, разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по снижению вредного воздействия вод и противопаводковой защите» (2014 г.);
- «Исследование водного режима и русловых процессов реки Шелонь, разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий по снижению вредного воздействия вод и противопаводковой защите» (2014 г.).

Отдельные части данной работы были доложены на следующих мероприятиях:

- на семинарах Отдела русловых процессов ГГИ в 2010-2012 гг.;
- на научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Гришанинские чтения) (Санкт-Петербург, 2012);
- на научной конференции «Contemporary hydrological issues in the research of Polish and Russian MSc and PhD students» (Торунь, Польша, 2012);
- на Всероссийском гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2013);
- на научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Гришанинские чтения) (Санкт-Петербург, 2014);
- на международной научной конференции «Deltas: genesis, dynamics, modeling and sustainable development» (Истомино, Бурятия, 2014);
- на VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2014);
- на IV международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, Грузия, 2014);
- на V международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства» (Тбилиси, Грузия, 2015);

- на научной конференции «Водные пути и русловые процессы» (Гришанинские чтения) (Санкт-Петербург, 2016).

В 2014 и 2016 гг. данная работа была представлена в форме лекции на курсах повышения квалификации для инженеров-гидрологов.

О структуре работы

Представляемая диссертация имеет следующую структуру. В первой главе дается общая характеристика различных аспектов проблемы донных наносов. А именно: кратко разбираются основные причины неудовлетворительного состояния расчетов расхода донных наносов, особенности транспорта в равнинных и горных реках, методы разграничения наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные, проблема гранулометрического состава донных отложений, проблема начала движения донных отложений, методы измерения расхода донных наносов, методы расчета расхода донных наносов, делается анализ выполненных предшественниками сравнений формул. Во второй главе приводится разработанная гидравлическая классификация рек, описываются данные измерений, выбранные в качестве основы для проверки формул, и дается методика сравнения формул. Третья и четвертая главы диссертации посвящены последовательной проверке и сравнению собранных формул на основе выбранных достоверных данных. Третья глава отведена равнинным рекам. В ней проверяются и сравниваются формулы высоты донных гряд, скорости их перемещения, расхода донных наносов, учитывающих гряды в явном виде, затем формулы, не учитывающие характеристики гряд. В четвертой главе отдельно рассматриваются грядовое и бесструктурное движение донных наносов в горно-предгорных реках. В разделе грядового движения сравниваются формулы, основанные на учете характеристик донных гряд и формулы, их в явном виде не учитывающие. В пятой главе в условиях различной обеспеченности данными измерений на основе формул, рекомендуемых автором для равнинных рек, осуществляется вывод локальных зависимостей расхода донных наносов в створах рек Севера и Северо-Запада.

Личный вклад

Все научные и практические результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором или в соавторстве с научным руководителем З.Д. Копалиани, кроме вывода локальной зависимости расхода донных наносов для р. Юг, который выполнен А.С. Самохваловым (раздел 5.1). Автор в этом разделе выполнила сравнение результатов, полученных по методу ГГИ, с методами других авторов.

Глава 1. Краткий обзор состояния проблемы транспорта наносов в реках

1.1 Основные причины неудовлетворительного состояния проблемы расчета расхода донных наносов в реках

Проблема расчета донных наносов (частный вопрос проблемы речных наносов) чрезвычайно сложна и многоаспектна. Она включает следующие, еще более узкие и до сих пор не решенные, вопросы [42]:

- Вопрос разграничения наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные: до сих пор не существует однозначных общепринятых количественных зависимостей.
- Вопрос, что считать донными наносами. Разные специалисты вкладывают различный смысл в понятие «донные наносы» (bed load): одни относят к ним только влекомые (катящиеся и скользящие), другие – еще и сальтирующие, при этом верхняя граница сальтации также различна (от 2 до 7-10 и более диаметров частиц).
- Вопрос учета условий частичной и полной подвижности руслового материала (донных отложений).
- Вопрос критических условий начала движения донных частиц. Во-первых, здесь так же, как и в вопросе о «донных наносах», имеет место несогласованность терминологии, во-вторых, обобщение существующих подходов осложняется спецификой экспериментов (лабораторных и натуральных), которые лежат в их основе.
- Вопрос учета в расчетах специфики таких условий как уклон, размер реки, гранулометрический состав донных отложений и форма транспорта донных наносов (грядовая или бесструктурная).

Все эти вопросы к настоящему моменту являются в большей или меньшей степени нерешенными.

Кроме того, имеющиеся данные натуральных измерений очень ограничены, и большая их часть характеризуется низкой точностью. Измерения в горных реках при больших расходах воды отсутствуют в принципе.

И наконец, проблема расчета расхода донных наносов дополнительно осложняется тем, что их движение носит пульсационный характер, и точность измерения, следовательно, зависит от периода осреднения.

1.2 Особенности транспорта донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках. Структурная и бесструктурная формы транспорта донных наносов

Транспорт донных наносов в равнинных реках имеет свои особенности:

- движение наносов в основном происходит в форме гряд (соблюдается условие: гладкость потока $\frac{H}{d} > 30$, где H – глубина потока, d – крупность донных отложений);
- крайние фракции донных отложений равнинных рек приходят в движение при близких скоростях потока, поэтому имеет место движение всей смеси одновременно.

Транспорт наносов в равнинных реках при активном перемещении песка в основном осуществляется в форме гряд. Гряды – микроформы речного русла типа дюн – представляют собой малоинерционные песчаные образования на дне потока, соизмеримые с глубиной потока, определяющие шероховатость дна, гидравлическое сопротивление потоку, вертикальные колебания отметок русла и расход донных наносов. Они порождаются макротурбулентными вихрями, шаг которых независимо от размера потока и режима течения изменяется от 2 до 10 глубин потока и составляет в среднем $6,5H$ [32]. Поэтому и длина гряды в среднем равна $6,5H$. Дюны обладают наибольшей устойчивостью по сравнению с другими грядовыми формами меньших размеров – рифелями, которые существуют в узком диапазоне гидравлических условий, в начальной стадии движения наносов.

В горно-предгорных реках выделяются следующие особенности транспорта донных наносов:

- транспорт донных наносов происходит лишь в периоды повышенной водности (половодья, паводки), а не в течение всего года, как в равнинных реках;
- частицы донных отложений приходят в движение при резко различающихся скоростях потока, что приводит к формированию русловой отмости.

В силу этих особенностей

- измерение расхода донных наносов в горной реке в межень представляет ограниченный интерес, а в многоводный период технически затруднительно (скорости течения достигают 8 м/с, паводки трудно прогнозируемы, кратковременны и часто происходят в ночное время);
- наиболее надежный способ оценки транспорта наносов в горных реках сегодня – его физическое моделирование, особенно потому, что горный поток может быть воспроизведен в лаборатории с соблюдением критериев динамического и кинематического подобия и без искажения геометрических масштабов наносов.

Несмотря на то, что преимущественной формой транспорта наносов в горно-предгорных реках является бесструктурная, в узком диапазоне гидравлических характеристик донные

наносы транспортируются в форме гряд. Существование гряд в горных реках было экспериментально доказано З.Д. Копалиани [33, 36]. Они формируются и существуют при следующих условиях:

- при гранулометрическом составе, близком к однородному – ситуация срыва русловой отмостки ($\frac{d_{90}}{d_{10}} \leq 4$): $\frac{H}{d_{90}} > 15$, $\frac{V}{V_0} < 4$, где d_{90} , d_{10} – процентиля крупности донных отложений по гранулометрической кривой, V , V_0 – средняя и неразмывающая скорости потока;
- при разнородном грансоставе: $\frac{H}{d} \geq 30$, $\frac{V}{V_0} < 4$.

1.3 Методы разграничения наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные

Как отмечалось выше, для расчетов расхода донных наносов в водных потоках принципиальное значение имеет разграничение наносов на влекомые, сальтирующие и взвешенные. Разграничение обычно выполняется через отношение сил, вовлекающих в движение частицу, к удерживающим ее силам.

Ряд исследователей (И.К. Никитин [1], А. Раудкиви [125], ВНИИГ [61, 62], П.И. Жюльен [113], А.Б. Клавен [20], А.Н. Крошкин [49]) осуществляет разграничение наносов через величину $\frac{V_*}{w}$, где $V_* = \sqrt{gHI}$ – динамическая скорость, м/с, g – ускорение свободного падения, м/с², I – уклон, w – гидравлическая крупность, м/с. Границы, задаваемые этими авторами, существенно отличаются друг от друга. Метод А.Б. Клавена представляется наиболее обоснованным, как проверенный на лабораторных и натурных данных.

Ф. Ингелунд, Л.С. Ван Рейн и Р.А. Бэгнольд выражают разграничение наносов графически путем построения кривых взвешивания [1]. Кривые взвешивания представляют собой зависимости безразмерного касательного напряжения на дне потока θ

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_T - \rho)gd_{50}}, \quad (1.1)$$

где $\tau = \gamma HI$ – касательное напряжение, Н/м², γ – удельный вес воды, Н/м³, ρ_T , ρ – плотности частиц и воды, кг/м³, d_{50} – диаметр, содержание которого в пробе составляет 50%, м, при котором начинается взвешивание донных частиц, от безразмерного диаметра частиц d_* ($d_* = d_{50} \left(\frac{(\rho_T - \rho)g}{\rho \nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}$, где ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с), выражающего режим их обтекания. На рисунках 1.1-1.2 представлены измерения донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках совместно с указанными кривыми и с кривой начала движения донных частиц А. Шильдса. Кривая Шильдса показывает значения безразмерного касательного напряжения на дне потока θ , при котором начинается движение донных частиц (иначе,

критерий Шильдса), при различных гидравлических режимах. Оба графика демонстрируют несоответствие кривых взвешивания данным измерений. Диапазон основных гидравлических характеристик измерений представлен в таблице 1.1.

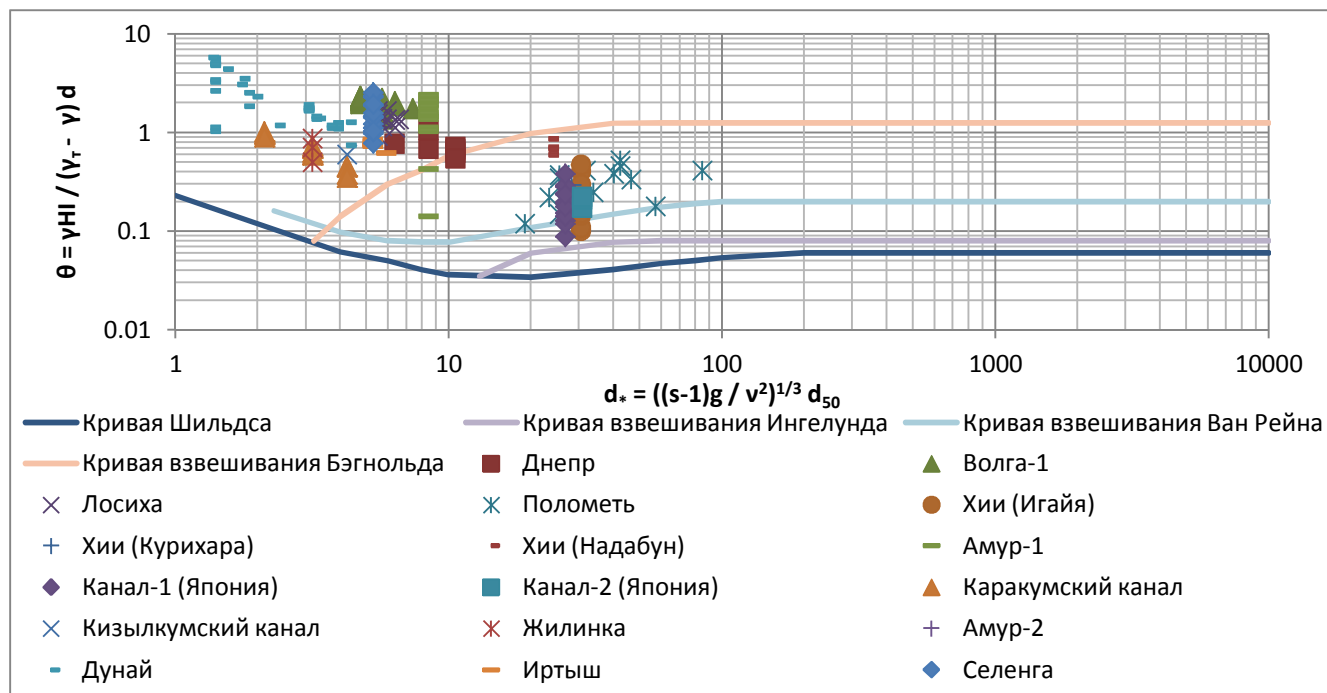


Рисунок 1.1 – Данные измерений донных наносов в равнинных реках [1] на фоне кривых взвешивания Ф. Ингелунда, Л.С. Ван Рейна и Р.А. Бэгнольда [1] и кривой начала движения А. Шильдса

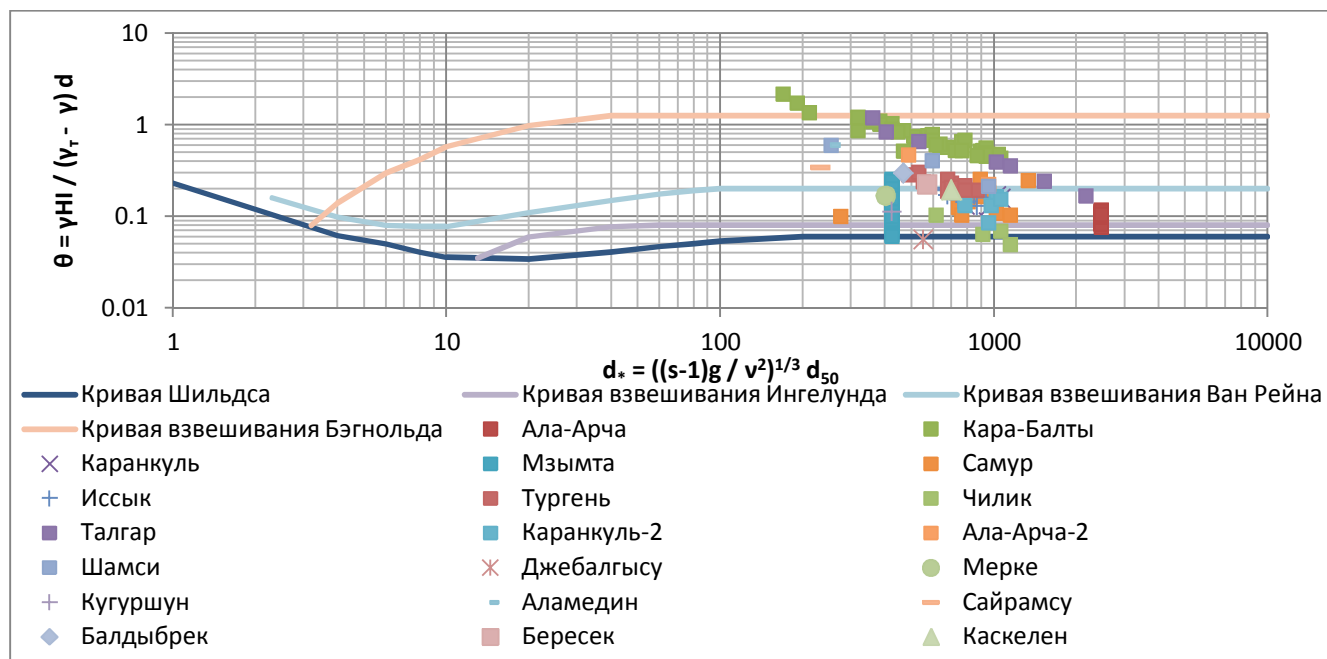


Рисунок 1.2 – Данные измерений донных наносов в горных реках [1, 48, 57, 76] на фоне кривых взвешивания Ф. Ингелунда, Л.С. Ван Рейна и Р.А. Бэгнольда [1] и кривой начала движения А. Шильдса

Таблица 1.1 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и донных отложений в натуральных измерениях в равнинных и горно-предгорных реках

Диапазон	Характеристика						
	Глубина H , м	Диаметр частиц d , мм	Скорость потока V , м/с	Уклон I	Динамическая скорость V_* , м/с	Безразмерное касательное напряжение θ	Число Рейнольдса Re_{*d}
Равнинные реки (наносы перемещаются в виде микроформ-гряд) [1]							
min-max	0,11-15,8	0,10-4,00	0,19-1,70	0,000010-0,001700	0,03-0,16	0,09-5,78	1,60-496
Горно-предгорные реки [1, 48, 57, 76]							
min-max	0,18-2,16	8-116	0,64-2,95	0,0053-0,045	0,14-0,64	0,05-2,18	1445-41815
Примечание – $Re_{*d} = \frac{v_* d}{\nu}$ – число Рейнольдса частицы по динамической скорости. Характеризует режим обтекания частицы (аналогично d_*).							

1.4 Гранулометрический состав донных отложений

Одной из основных, наиболее сложных, проблем расчета расхода и стока донных наносов в реках является учет крупности и фракционного состава руслового материала. Крупность руслового аллювия в реках изменяется в широких пределах в пространстве и во времени в зависимости от уклона дна, расхода воды, глубины и скорости потока и морфологического строения русла. Подробные измерения на равнинных реках, например на р. Полонети, показывают, что с увеличением расхода воды средняя крупность песка на участке русла может изменяться в 7,0 раз [46].

На рисунках 1.3 и 1.4 видно, как меняется гранулометрический состав поверхностного слоя руслового материала на различных морфологических фрагментах русла гидравлической размываемой модели предгорного участка р. Утулик [33].

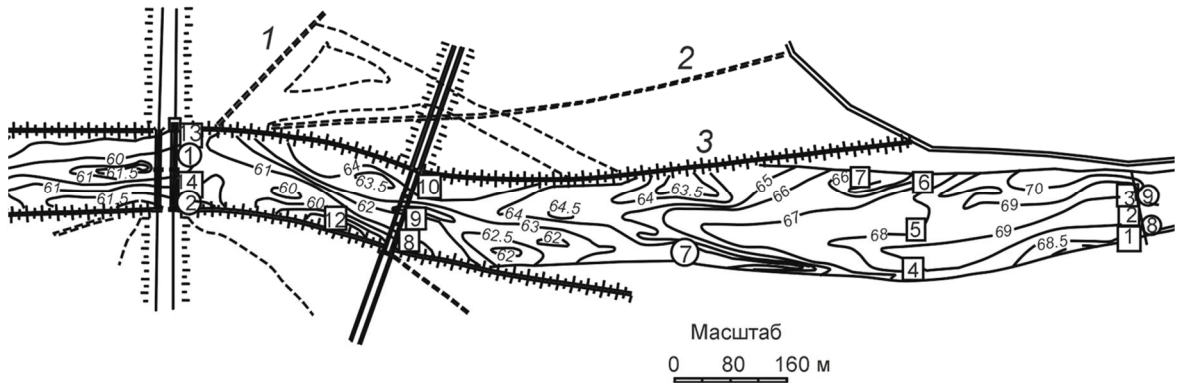


Рисунок 1.3 – Схема моделируемого участка русла р. Утулик. Цифрами в квадратах обозначены местоположения отбора проб, иллюстрируемых рисунком 1.4 [33]

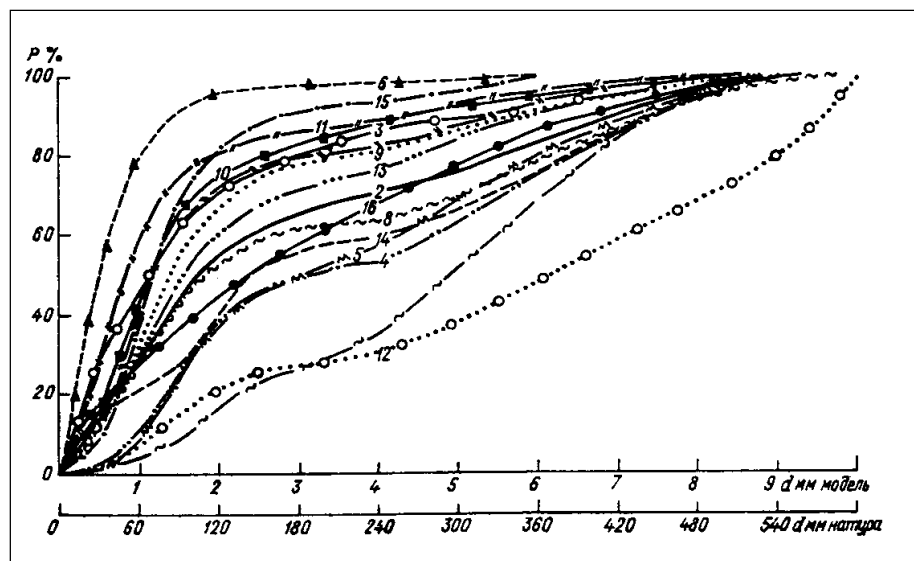


Рисунок 1.4 – Гранулометрический состав донных отложений в разных точках гидравлической модели р. Утулик [33]

Многочисленные исследования гранулометрического состава руслового материала, выполненные в СССР и России и во многих странах мира, показывают, что состав донных отложений поверхностного слоя дна существенно отличается от гранулометрического состава подповерхностного слоя. Причина заключается в факте постоянного контакта поверхности донных отложений с русловым потоком, приводящем к непрерывной сортировке донных отложений по крупности. Подповерхностный слой руслового материала как правило, имеет иное (геологическое) происхождение и меньшую крупность.

Этот факт хорошо иллюстрируется рисунком 1.5, на котором представлены обширные, тщательно выполненные измерения грансостава донных отложений на различных участках 100 рек с крупным составом руслового аллювия, расположенных в южной части Скалистых гор и плато Колорадо (штаты Колорадо, Юта и Айдахо в США) [124]. Диапазон гидравлических

характеристик потока в этих измерениях составил: уклоны дна 0,0003-0,07, глубины при расходе воды в бровках русла 0,2-5,0 м и ширины при этих расходах воды 2-200 м.

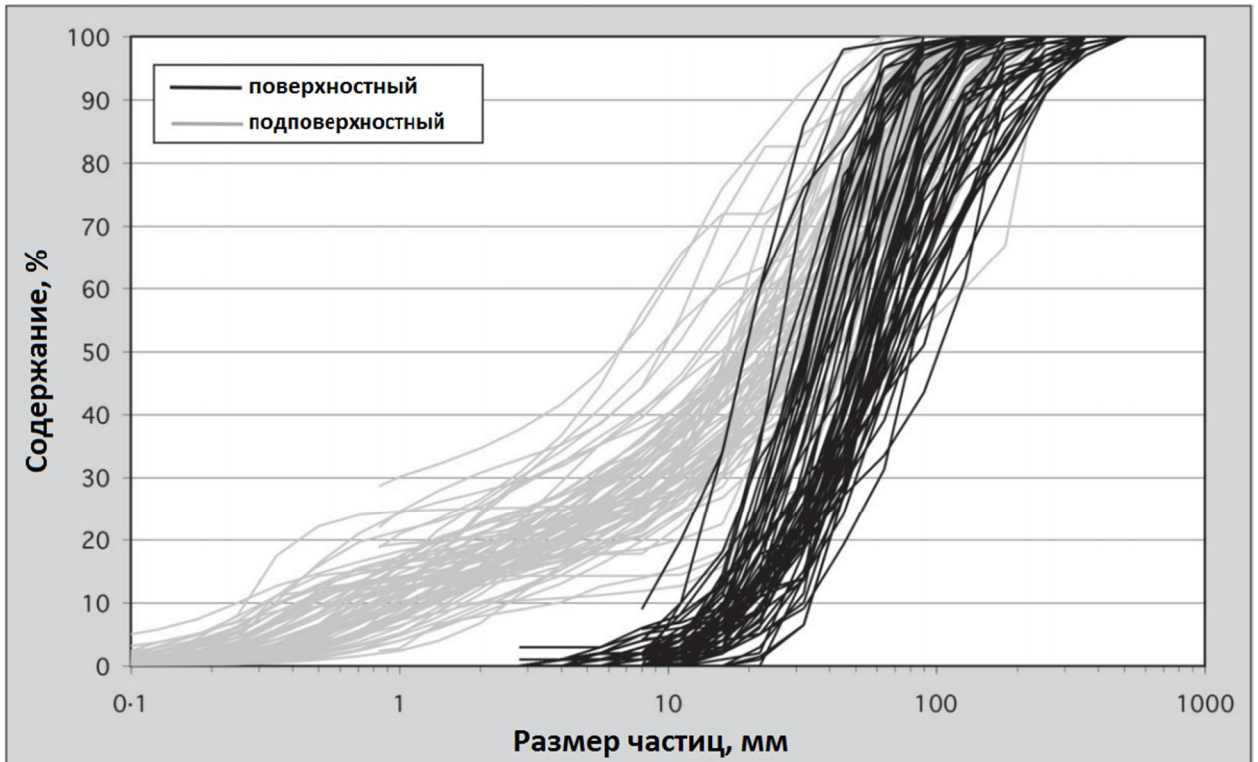


Рисунок 1.5 – Гранулометрические кривые поверхностного и подповерхностного слоев донных отложений рек южной части Скалистых гор и плато Колорадо [124]

Из рисунка 1.5 следует, что подповерхностный слой донных отложений на 20-40% состоит из песка и гравия, тогда как в поверхностном слое донных отложений песка нет, а гравий практически отсутствует. Это обстоятельство подтверждается и всеми исследованиями, выполненными в СССР [31, 48, 57, 67, 76, 81].

Русла нижних течений рек характеризуются меньшим различием (дифференциацией) крупностей поверхностного и подповерхностного слоев, т.е. меньшей вероятностью формирования русловой отмости.

1.5 Начальные условия сдвига донных частиц в песчаных и гравийно-галечных руслах рек

Выведение из состояния покоя и транспорт руслового материала в равнинных и горно-предгорных реках имеют существенную специфику. Транспорт донных наносов в равнинных реках с большей или меньшей интенсивностью имеет место в течение всего года, тогда как в руслах горно-предгорных рек он носит непостоянный, прерывистый характер. Кроме того, в горно-предгорных реках вовлечение донных частиц в движение происходит избирательно:

разные фракции гравийно-галечно-валунной смеси приходят в движение при различных скоростях потока, что приводит к большей, чем в равнинных реках, сортировке смеси и формированию самоотмостки.

Отмеченное можно проиллюстрировать рисунком 1.6, из которого следует, что в равнинных реках мельчайшие и крупные фракции песка приходят в движение при близких абсолютных значениях скорости потока, тогда как в руслах горно-предгорных рек, сложенных из крупного аллювия, процесс вовлечения в движение всех фракций руслового материала носит сложный характер.

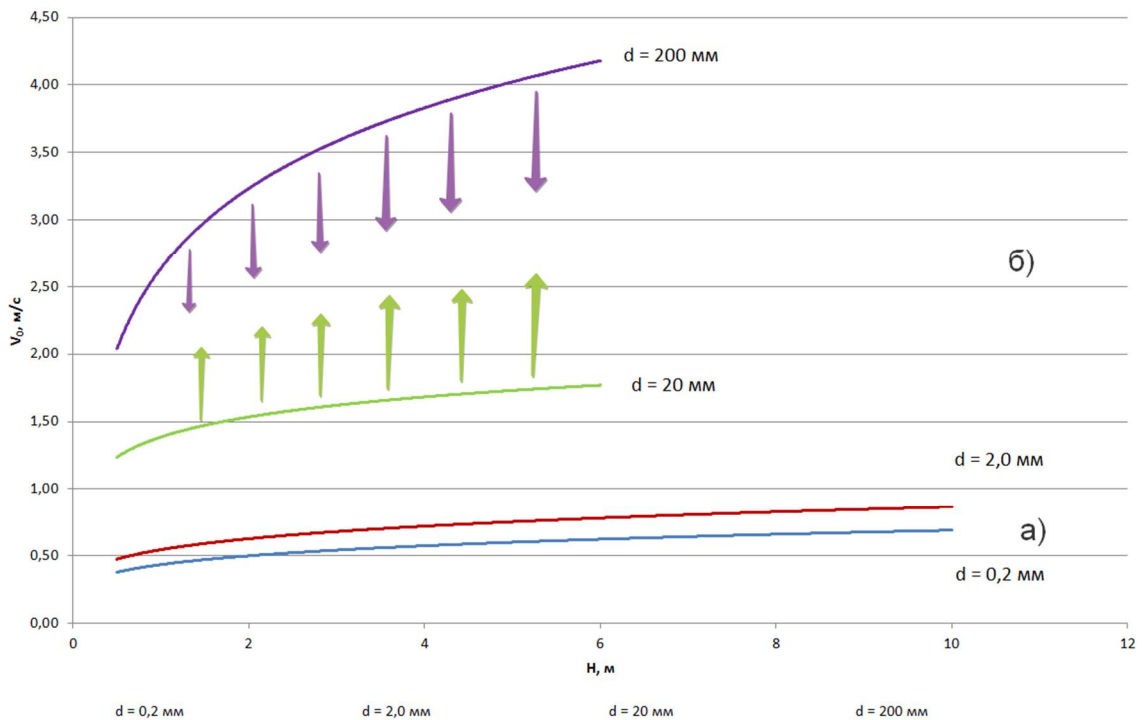


Рисунок 1.6 – Условия начала движения донных отложений в равнинных (а) и горно-предгорных (б) реках [42]

Количественное определение начальных условий сдвига донных частиц в водных потоках играет решающую роль в расчетах расхода донных наносов, поскольку эта величина входит в структуру почти всех расчетных зависимостей расхода донных наносов. Как известно, существует два основных подхода к оценке предельных условий сдвига несвязных частиц на дне водных потоков: с помощью расчета критической скорости потока V_0 , м/с при которой нарушается устойчивость частиц на дне, и с помощью влекущей силы τ_0 – предельных значений касательных напряжений потока, при которых частицы, слагающие дно, начинают двигаться. Связь между критическим значением касательного напряжения и неразмывающей скоростью выражается зависимостью $\tau_0 = \frac{\rho g V_0^2}{C^2}$, где C – коэффициент Шези.

В СССР и России в основном используется понятие неразмывающей скорости потока. Формулы разных авторов для расчета предельных критических скоростей сдвига донных частиц на дне водных потоков отражают различные подходы к решению указанной задачи и различные теоретические представления о процессе отрыва частиц и основных факторах, обуславливающих это явление. Для обоснования или верификации своих формул авторы используют разный экспериментальный материал. С учетом этого обстоятельства, существующие формулы рекомендованы для мелких или крупных наносов или одновременно для тех и других. Фиксация начала движения донных частиц производится визуально. Попытка привязать имеющиеся формулы неразмывающих скоростей потока к количественному критерию для рек горно-предгорной зоны была предпринята З.Д. Копалиани [37].

Для оценки критических условий сдвига донных частиц в водных потоках в зарубежной литературе преобладает подход, основанный на теории влекущей силы и графике зависимости безразмерного критерия А. Шильдса θ от числа Рейнольдса частицы по динамической скорости Re_{*d} (см. выше). Этот график в основном также основан на качественном (визуальном) подходе к определению критических значений критерия Шильдса или экстраполяции расхода донных наносов до нулевых значений. Согласно Шильдсу, в переходной и квадратичной областях сопротивлений критическое значение числа Шильдса составляет $\theta_0 = 0,06$. Однако последующими опытами других авторов было показано, что это значение преувеличено. Оно составляет в литературе от 0,015 до 0,047 и в среднем 0,03 [14, 123, 132, 145 и др.]. Ряд авторов пытались определить условия сдвига частиц не визуально, а количественно [14, 132, 147].

В 2013 г. З.Д. Копалиани выполнены систематизация и анализ ситуации, сложившейся в проблеме расчета предельных условий сдвига донных частиц в водных потоках, и в работе [37] предлагается в качестве наиболее обоснованного критерия начала движения частиц в горно-предгорных реках использовать значение коэффициента Шильдса $\theta_0 = 0,03$.

Разнородные донные отложения более подвижны по сравнению с однородными той же средней крупности в результате большей открытости крупных частиц воздействию потока. Чтобы это учесть, в расчетах критической скорости ряд авторов вводят поправочные коэффициенты вида $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}$ [11, 14, 57, 58, 132].

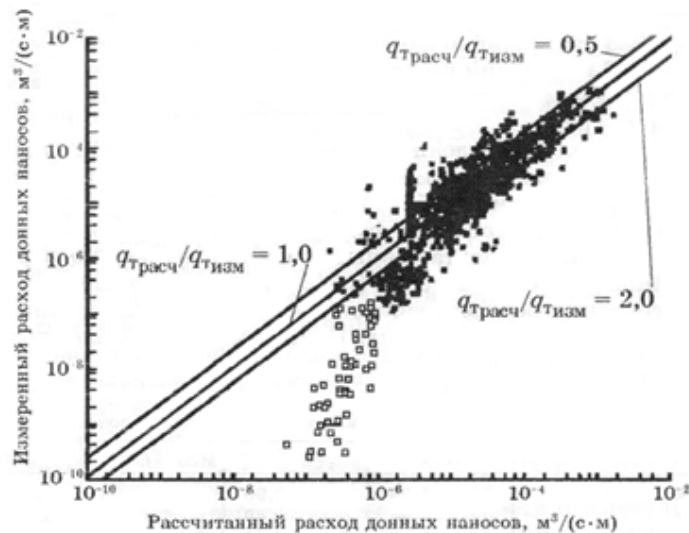
Из отмеченного выше следует, что точное определение начальных условий сдвига покоящихся на дне потока частиц, т.е. вовлечения их в движение, характеризуется большой неоднозначностью и неопределенностью.

По мере увеличения скоростей потока связь между количеством вовлекаемых в движение частиц (расходом донных наносов) и гидравлическими характеристиками становится однозначной, вследствие чего повышается и точность расчета расхода донных наносов. Это

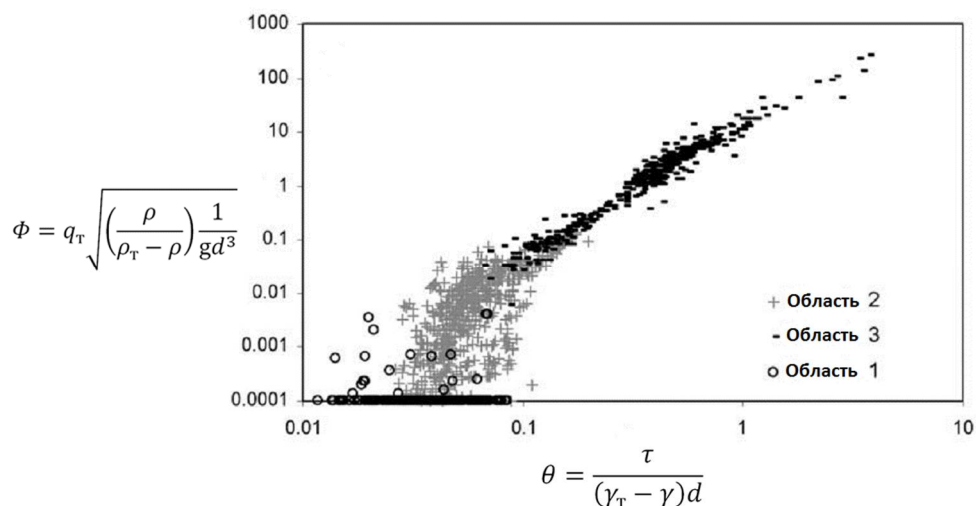
обстоятельство хорошо иллюстрируется рисунками 1.7 (а, б). Первый из них (1.7а) получен отечественными авторами [42] и характеризует грядовый режим транспорта донных наносов, второй (1.7б) – из работы зарубежных авторов [126] и соответствует бесструктурному транспорту. Рисунок 1.7а показывает соотношение между рассчитанными и измеренными значениями расхода донных наносов. Из графика следует, что в начальной стадии движения донных наносов используемая расчетная формула не работает, тогда как при развитом транспорте наносов она дает удовлетворительный результат ($0,5 \leq \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}} \leq 2$). На рисунке 1.7б дано соотношение двух параметров: числа Шильдса θ и безразмерной величины, выражающей транспорт донных наносов Φ (функция Х. Эйнштейна)

$$\Phi = q_{\text{T}} \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_{\text{T}} - \rho) g d^3}}, \quad (1.2)$$

где q_{T} – удельный расход донных наносов, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}$. На этом графике точки группируются в 3 области: отсутствие транспорта наносов, слабый транспорт и интенсивный транспорт. Из диаграммы следует, что устойчивая связь $\Phi(\theta)$ образуется только при интенсивном транспорте донных наносов. Частичное движение руслового материала на начальных стадиях движения донных частиц происходит в узком диапазоне изменения гидравлических характеристик потока и не играет существенного значения в общем стоке донных наносов, тогда как полный транспорт всех фракций руслового материала, однозначно связанный с гидравлическими характеристиками потока, полностью определяет расход и сток донных наносов.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Зависимости расхода донных наносов от определяющих факторов в начальной стадии их движения и при интенсивном транспорте по данным отечественных (а) [42] и зарубежных (б) [126] авторов

Примечание – на рисунке 1.7а пустыми квадратами обозначена область слабого транспорта донных наносов, черными – интенсивного. На рисунке 1.7б область 1 – транспорт отсутствует, область 2 – слабый транспорт, область 3 – интенсивный транспорт.

1.6 Проблема и методы измерения расхода донных наносов

Различают прямые и косвенные методы измерений характеристик донных наносов в речных руслах.

К прямым методам относятся объемный метод (измерение наносов, накопленных при известных гидравлических условиях за определенный интервал времени в водохранилищах, отстойниках и дельтах рек, в поперечных русловых траншеях, ямах-ловушках), измерения с помощью донных батометров и эхолотирование дна с движущимися мезоформами и микроформами речного русла.

К косвенным методам измерений, в которых оценка характеристик движения донных наносов производится опосредованно, через физические параметры потока, связанные с движением донных наносов, относятся методы трассеров, оптические методы, метод естественного электрического поля, методы регистрации соударения частиц, метод регистрации сейсмических волн, а также методы, использующие видео или аудиоаппаратуру.

Все перечисленные косвенные методы измерений, разрабатываемые в рамках специальных научно-исследовательских программ, основанные на регистрации тех или иных физических эффектов, сталкиваются с непреодолимой до настоящего времени проблемой

надежной калибровки и для массового использования в практических целях оказываются непригодными.

Донную ловушку – батометр – для улова движущихся по дну реки наносов в виде мешка, опускаемого на дно с помощью штанги, впервые в мире применил Ф. Шаффернак в 1908 г. в Австрии. Вскоре с этой же целью С. Куруман использовал донный батометр в виде ящика с отверстием и решеткой [30]. Впоследствии для измерения крупности и количества (расхода) наносов, переносимых в придонной области потока, различными авторами предложено большое число и разнообразие конструкций донных батометров.

Состояние и итоги деятельности в этой области в первой половине XX столетия отражены в работе Г.И. Шамова [81]. Подводя полувековой опыт создания и постоянного совершенствования методов и приборов для измерения расхода и стока донных наносов в реках (батометров), Шамов делает следующие выводы:

- Вносимые в поток батометры всех конструкций кардинально изменяют естественную структуру руслового потока, морфологию русла в местах их установки и режим транспорта наносов.
- Все батометры имеют те или иные конструктивные недостатки, как правило, не обеспечивающие плотного сопряжения батометра с дном с учетом неровностей его рельефа и наличия на дне рифелей, гряд или крупных галек. В результате этого происходит размыв дна перед входным отверстием прибора, нарушается естественный режим движения наносов и условия их поступления в батометр.
- В текущей воде при значительных глубинах, скоростях потока более 2-3 м/с и интенсивном транспорте донных наносов опустить и установить батометр на дно трудно. Имеет место существенный снос прибора по течению.
- Многолетняя практика применения батометров-ловушек со сплошными стенками показывает, что их использование на реках чрезвычайно затруднительно.
- При использовании батометров-сеток возникает проблема влияния размера ячеек сетки на показания батометра.
- Тарировка приборов в отношении количества улавливаемых ими наносов в зависимости от скорости потока, продолжительности выдержки прибора на дне, состава и формы транспорта наносов у дна представляется трудно осуществимой. Даже наиболее конструктивно совершенные батометры требуют многократного повторения измерений. Их применение ограничено конкретными условиями водного и руслового режима рек.
- Неравномерность поступления крупных наносов в сетчатые батометры по мере их накопления нарушает естественный режим дальнейшего поступления наносов в батометр, приводит к обходу ими батометра и вымыванию более мелких частиц через сетку.

Общее заключение, сделанное Шамовым в результате выполненного анализа, состоит в том, что «все батометры не удовлетворяют основному требованию, которое к ним предъявляется: достоверности и точности учета стока наносов» [81]. По мнению Шамова, это затрудняет широкое распространение на сети измерений донных наносов, и их применение приходится рассматривать как специальные исследования, проводимые на ограниченном количестве станций, хорошо оборудованных и при наличии квалифицированного персонала.

Обобщение Шамова определило особенности стратегического развития этой деятельности в нашей стране на много лет вперед. Во-первых, в СССР, в отличие от других стран, деятельность в направлении дальнейшего поиска и конструирования новых видов и типов донных батометров была резко ограничена. Во-вторых, стали развиваться альтернативные методы измерения расхода и стока донных наносов, такие как объемный метод и метод измерения расхода донных наносов по данным наблюдений за перемещением на дне гряд устойчивого профиля.

За рубежом вывода, аналогичного сделанному Шамовым, получено не было, и в 1971 г. Геологической службой США был разработан батометр Хелли-Смита, наиболее широко распространенный и используемый по настоящее время во всем мире. Этим батометром выполнена и выполняется большая часть измерений расхода донных наносов в реках, представленных в литературных источниках в качестве наиболее используемых при разработке или верификации формул расхода донных наносов. Батометр Хелли-Смита предназначен для использования в реках с гравийным грунтом, с крупностью руслового материала 2,0-10,0 мм и со скоростями течения до 3,0 м/с. Батометр имеет квадратное входное отверстие с размером сторон 7,6 см, длиной улавливающего мешка 46,0 см и с размером ячеек сетки 0,25 мм.

В последующем, в основном в США, в Европе и в Китае, были созданы десятки типов и модификаций батометров разной конструкции, выполнены сотни исследований по их практическому применению и калибровке на реках с песчаным и гравийно-галечным дном [120]. Эти батометры имели разные конструктивные особенности, размеры, вес, величину ячеек сеток для улавливания придонных наносов и эффективность их улавливания. Основной вывод, вытекающий из многолетнего опыта разработки и использования батометров на Западе, состоит в утверждении, что батометры должны разрабатываться специально для условий, в которых им предстоит работать.

Можно сделать общее заключение, что огромные усилия и ресурсы, направленные во второй половине XX и в начале XXI веков во многих странах мира на создание метода измерения донных наносов с помощью батометров, не имели успеха. Ни один пункт критических выводов, сделанных Шамовым в середине XX века, последующими исследованиями не удалось решить или опровергнуть.

Логическим следствием, вытекающим из полувекового опыта и практики создания в СССР и в других странах приборов и методов для измерения, изучения и количественной оценки расхода и стока донных наносов в реках [81] явилось осознание необходимости разработки качественно новой технологической системы измерений полного набора русловых характеристик речного потока, гидравлического режима и механизма транспорта наносов на реальной реке, позволяющей непосредственно в натуральных условиях изучать все стороны взаимодействия потока, русла и наносов с точностью измерений, не отличающейся от лабораторной. С этой целью в 1960-1967 гг. Государственным гидрологическим институтом на р. Полонети был создан стационарный комплекс для изучения транспорта наносов [46]. На нем был разработан способ измерения расхода донных наносов через характеристики донных гряд методом повторного продольного эхолотирования речного русла. Этот метод впоследствии стал применяться в полевых исследованиях ГГИ на больших и малых реках.

Вслед за стационарными наблюдениями за транспортом донных наносов, развернутыми в СССР на р. Полонети, измерительные комплексы для постоянного мониторинга донных наносов были созданы на малых реках и в других странах (США, Англии, Италии и пр.) [98, 116, 117, 122, 127], но, в отличие от отечественного подхода, расход донных наносов на этих комплексах измерялся объемным методом.

Обширные данные многочисленных измерений характеристик транспорта наносов, выполненных разными исследователями многих стран мира в лабораторных и натуральных условиях в течение XX столетия (до 1980 г.), суммированы в работе [94]. Эта публикация содержит данные о 55 лабораторных и 24 натуральных исследованиях, выполненных за рубежом.

Лабораторные исследования проводились в гидравлических лотках разных размеров в широком диапазоне гидравлических условий, крупности и состава руслового материала. Наибольший диапазон гидравлических режимов был охвачен в экспериментах Г. Гилберта (889 измерений), Х.П. Гая и др. (339 измерений), Ф. Мэвиса и др. (293 измерения), Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера (135 измерений), С. Сато и др. (243 измерения), Г.П. Уильямса (177 измерений), а также в исследованиях экспериментальной станции водных путей США (1043 измерения).

Лабораторные эксперименты были выполнены как в условиях бесструктурного (без гряд), так и грядового транспорта донных наносов. Однако, грядовое движение наносов изучалось только в 2 из 55 лабораторных исследований: в опытах Гая, Саймонса и Ричардсона и Уильямса. В опытах Гилберта и некоторых других исследователей факт наличия гряд отмечался, но их геометрические и динамические характеристики не фиксировались.

Натурные измерения также были выполнены в широком диапазоне гидравлических условий: в земляных каналах, равнинных и горно-предгорных реках. Грядовая форма транспорта донных наносов в натуральных условиях не изучалась ни в одном из 24 исследований.

Во всех натурных исследованиях измерялся расход наносов донного материала: донных наносов и суммарный расход донных и взвешенных наносов. Измерения выполнялись батометрами различных конструкций для измерения взвешенных и донных наносов.

1.7. О методах расчета расхода донных наносов

Методы (далее в тексте – формулы) расчета расхода донных наносов можно разделить на две основные группы: учитывающие и не учитывающие в явном виде грядовую структуру перемещения донных наносов, наиболее распространенную в реках.

Формулы, учитывающие гряды, в общем виде имеют следующую структуру:

$$q_T = \alpha h_T C_T, \quad (1.3)$$

где q_T – удельный расход донных наносов в рыхлом теле, $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$, α – коэффициент формы гряды, в среднем равный 0,6, h_T – высота гряды, C_T – скорость перемещения гряды.

Таким образом, при грядовой форме транспорта донных наносов, располагая надежными данными или формулами для расчета высоты гряд h_T и скорости их движения C_T , можно рассчитать расход донных наносов.

Формулы для высоты и скорости перемещения гряд относительно немногочисленны, среди них есть как расчетные, так и теоретические, практическое применение которых затруднительно в силу сложности или невозможности определения некоторых входящих величин. Большинство расчетных формул принадлежит советским ученым. Среди формул высоты и скорости гряд имеются полученные теоретическим путем и эмпирические, основанные на натурных, лабораторных данных или и тех и других. Характерная структура расчетных формул для высоты гряд (В.Ф. Пушкарева (1948), Н.С. Знаменской (1968) и др.): $h_T = f(H, d, V, V_0, w, Fr)$, – для скорости перемещения гряд (Н.Х. Брукса (1955), М.А. Великанова и Е.М. Минского (1955) и др.): $C_T = f(H, d, V, V_0, w, Fr, h_T)$, где $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда. Собранные в настоящей работе формулы h_T и C_T с подробным их описанием даны в таблицах А.1-А.3 приложения.

Основную массу формул для расхода донных наносов составляют не использующие в своей структуре характеристики гряд. Эти формулы так же, как и рассмотренные выше, получены эмпирически (на основе натурных, лабораторных данных или тех и других) или теоретически. Почти все они базируются на одном из трех подходов к расчету расхода донных наносов. Первый основан на понятии начала движения наносов. В качестве критерия подвижности выбирается критическое значение одной из следующих определяющих величин: скорости потока $q_T = f(V_0)$ (В.Н. Гончарова (1933), Л.Г. Гвелисиани (1946) и др.), расхода воды

$q_T = f(q_0)$ (А. Шоклича (1962), Р.Т. Милхауза (1987) и др.), касательного напряжения на дне $q_T = f(\theta_0)$ (М.П. Дю Буа (1879), А.Ф. Шильдса (1936) и др.) или энергетического (гидравлического) уклона $q_T = f(I_0)$ (Г.М. Смарта (1984)). Второй подход, вероятностный $q_T = f(P)$ (Х.А. Эйнштейна (1942, 1950), К.Б. Брауна (1950)), основан на представлении о перемещении наносов, как о случайном процессе. Третий тип – это регрессионные зависимости, в которых расход донных наносов является функцией нескольких переменных (А.Н. Крошкина и Г.В. Калиниченко (1983), Э. Мейер-Петера (1934) и др.). Формулы этих трех групп, помимо величин, применяемых для расчета высоты и скорости гряд, в качестве базовых используют также удельный вес воды γ и донных частиц γ_T , динамическую скорость потока V_* , безразмерное касательное напряжение θ , удельный расход воды q и уклон I . Используемые в настоящей работе формулы этой категории приведены в таблице А.4.

И отдельное место занимает множество локальных и региональных формул, получаемых для конкретного участка конкретного русла или для рек определенного региона (см. главу 5).

1.8 Анализ сравнений формул расчета характеристик гряд и расхода донных наносов в исследованиях предшествующих авторов

1.8.1 Высота гряд

Несмотря на значительное количество расчетных формул для высоты донных гряд, их количественная проверка на основе массовых измерений до сих пор не проводилась. Существует только одна работа Ю.М. Корчохи [46], в которой выполнена проверка четырех формул: В.Ф. Пушкарева, Н.С. Знаменской, А.Ф. Кудряшова и В.С. Кнороза. Формулы проверялись на основе измерений в р. Полонети при следующих гидравлических условиях: $0,30 \leq V \leq 1,70$ м/с, $0,16 \leq H \leq 2,50$ м, $0,6 \leq d \leq 5,0$ мм. Наиболее удовлетворительные результаты получены по формуле Пушкарева, наибольшее несоответствие с натурой дала формула Кудряшова. Также Корчоха проверил собственную формулу на данных по рр. Песочной, Кемке и Хии, на которых диапазон основных гидравлических характеристик был следующий: $0,40 \leq V \leq 0,93$ м/с, $0,11 \leq H \leq 1,03$ м, $0,30 \leq d \leq 1,44$ мм, а также на лабораторных данных Н.С. Знаменской [27] и К. Синохары и Т. Цубаки [131]. Формула показала хорошее соответствие натуре.

1.8.2 Скорость перемещения гряд

На сегодня существует несколько десятков формул для расчета скорости перемещения донных гряд в реках, однако анализ, взаимное сравнение этих формул и выяснение их соответствия данным массовых измерений на реках до сих пор не выполнены. Существует только три работы, в которых проведена их выборочная проверка [42, 46 и 73]. Все они были выполнены в Отделе русловых процессов (ОРП) ГГИ.

Так, Ю.М. Корчоха выполнил сравнение результатов расчетов скорости перемещения гряд по формулам В.Ф. Пушкарева, Н.С. Знаменской, А.Ф. Кудряшова и В.С. Кнороза с данными измерений на р. Поломети [46]. Наилучшие результаты были получены по формуле Кнороза. Формулы Пушкарева и Кудряшова дали результаты, мало отличающиеся друг от друга и превышающие данные измерений в 2-3 раза.

Корчоха выполнил также сравнение результатов расчета скорости перемещения гряд по своей формуле с данными измерений на реках Волге, Днепре и Хии. Отклонение данных расчетов по формуле Корчохи от измеренных значений во всех случаях составило менее 50%.

В статье Б.Ф. Снищенко и З.Д. Копалиани [73] приводятся 30 формул разных авторов, предназначенных для расчета скорости перемещения гряд. Для трех характерных значений числа Фруда, относящихся к лотковым экспериментам ($Fr = 0,94$), малым рекам (Полометь, $Fr = 0,33$) и крупным рекам (Иртыш, $Fr = 0,11$), Снищенко и Копалиани было выполнено выборочное сравнение результатов по 15 расчетным формулам и сделаны выводы об их пригодности для рассмотренных условий.

Для р. Поломети лучший результат (наименьшее отклонение от измеренных значений) получен по формуле Корчохи (3,5%). Близкие значения дали формулы Снищенко-Копалиани-Твалавадзе (6,5%), Снищенко-Копалиани (14,9%), Кондепа-Гарде (16,4%) и Доу Го-жэня (20,7%). Неплохие результаты выявлены при расчете по формулам Кнороза (41,9%) и Кудряшова (49%).

Для лотковых гряд, образованных крупными наносами лучшие результаты получены по формулам Снищенко-Копалиани (2,3%), Пушкарева (2,7%) и Кудряшова (3,8%). Хорошие результаты получены по зависимостям Снищенко-Копалиани-Твалавадзе (10,2%), Кондепа-Гарде (14,6%) и Барекяна (15,5%).

В случае больших равнинных рек хорошие результаты дали формулы Снищенко-Копалиани-Твалавадзе (31,4%), Снищенко-Копалиани (33,3%) и Кондепа-Гарде (38,9%).

В работе З.Д. Копалиани и А.А. Костюченко [42] выполнено сравнение результатов расчетов скорости перемещения гряд по 16 формулам разных авторов с данными измерений Ю.М. Корчохи на р. Поломети. В этот список формул входят все формулы, приведенные в

таблице А.2 за исключением формул В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина, Х.К. Лиу и Н.Х. Брукса, а также формула Нуриддинова. Отклонение рассчитанных величин от измеренных в процентах оценивалось по формуле $\Delta = \frac{C_{гизм} - C_{грасч}}{C_{гизм}} 100\%$.

Таким образом, по каждой из формул определялись максимальное (положительное) и минимальное (отрицательное) отклонения рассчитанных величин от измеренных. Наименьшие отклонения были получены по формулам З.Д. Копалиани (+28%; -40%), Т. Цубаки (+78%; -67%), Доу Го-женя (+28%; -53%) и Ю.М. Корчохи (+107%; -23%).

Эти результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений относятся к варианту расчета, когда высота гряд, входящая в некоторые формулы для скорости гряд, известна из данных измерений.

В варианте сопоставления расчетов с измеренными величинами, когда значение высоты гряд, входящей в формулу скорости их движения, определялось по рекомендациям авторов этих формул, наилучшие результаты были получены по зависимостям Б.Ф. Сنيщенко и З.Д. Копалиани (+18%; -56%), Ю.М. Корчохи (+49%; -27%), З.Д. Копалиани (+73%; -67%) и А.Ф. Кудряшова (+38%; -81%).

Анализ данных работ позволяет сделать заключение, что на их основании в силу недостаточного охвата формул или данных измерений разработать рекомендации по расчету скорости перемещения в гряд в реках при тех или иных условиях невозможно.

1.8.3 Расход донных наносов

В таблице Б.1 представлена обобщенная информация о результатах взаимного сравнения расчетов расхода донных наносов по формулам различных исследователей, составленная на основе литературных источников, в которых ряд отечественных и зарубежных авторов выполнили сравнение своих формул с другими формулами и с данными фактических измерений в гидравлических лотках и на реках. При этом авторы использовали для сравнения различные данные измерений: данные измерений в гидравлических лотках, полученные по разным методикам в диапазоне гидравлических характеристик потока и крупности наносов, характерных для горно-предгорных и равнинных рек, и натурные измерения на отдельных реках или группе рек, также выполненные разными методами и средствами измерений (графа 3 таблицы Б.1).

Количество сравниваемых формул у разных авторов колеблется в пределах от 2 до 200 (графа 2 таблицы). В графах 4 и 5 соответственно представлены фамилии авторов формул, показавших наилучшие результаты (графа 4) и авторов формул, участвовавших во

взаимосравнении (графа 5). Все формулы авторов, перечисленных в этой графе, представлены в приложении А. Из этого приложения следует, что формулы охватывают все известные виды структуры формул, в которых расход донных наносов выражен в функции от скорости потока, касательного напряжения, расхода воды и уклона водной поверхности, или определяется на основе регрессионных уравнений, или вероятностным методом.

В графе 3 таблицы Б.1 указывается, какой метод измерений расхода донных наносов использовался в натурных исследованиях (объемный метод или батометр). В исследованиях отечественных авторов применялись батометры различных конструкций, объемный метод и метод повторного продольного эхолотирования. В исследованиях зарубежных авторов чаще всего использовался батометр Хелли-Смита.

Из таблицы Б.1 следует, что ряд авторов, в основном зарубежных, для сравнения с фактическими данными использовали только данные измерений в гидравлических лотках (Х.С. Лоу, Г. Бомбар и М.С. Гуней, С. Талукдар и др.). Часть отечественных исследователей (И.В. Боголюбова, И.В. Егиазаров, А.Ю. Умаров) и некоторые зарубежные (Г.М. Хаберсак и Дж.Б. Ларонн, Дж.Дж. Барри и др., Б. Каменен и М. Ларсон, Ч.Ч. Киат и др.) для сравнения с расчетными формулами использовали только результаты натурных измерений. Остальные авторы сравнивали формулы, используя данные лабораторных и натурных измерений.

Из таблицы Б.1 также следует, что зарубежные исследователи при взаимосравнении формул для расчета расхода донных наносов использовали формулы только зарубежных авторов. Эти формулы выражают расход донных наносов в основном в функции касательных напряжений. Отечественные исследователи при взаимосравнении формул большей частью использовали расчетные методы отечественных и, в меньшей степени, зарубежных авторов. В отечественных зависимостях расход донных наносов выражается в основном в функции скорости потока.

Из всестороннего анализа данных, представленных в таблице Б.1, вытекает, что в настоящее время, опираясь на результаты большого числа исследований по проблеме расчета расхода донных наносов, в силу большой разнородности этой информации (методов и условий измерений, приборов и точности измерений) не представляется возможным сделать однозначное заключение или, тем более, разработать окончательные рекомендации о предпочтительности тех или иных формул для выполнения практических расчетов расхода донных наносов в реках. Наиболее обоснованными представляются подход и результаты работы [42], в которой за основу принят дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках с учетом грядовой и безгрядовой форм перемещения донных наносов. Однако, в этой работе, с нашей точки зрения, недостаточное внимание уделяется формулам зарубежных авторов, выражающих расход донных наносов

через касательное напряжение на дне потока. Этот вопрос более подробно освещен в работе [138], однако, полученные в ней выводы также нельзя рекомендовать для практических расчетов, так как большинство сравниваемых формул имеют однотипную структуру и их сравнение производилось только с данными лабораторных экспериментов.

Глава 2. Материалы и методика расчетов

2.1 Гидравлическая классификация рек применительно к расчетам расхода донных наносов

В соответствии с концепцией дифференцированного подхода к расчетам расхода донных наносов и особенностями транспорта донных наносов в равнинных и горно-предгорных реках, в рамках данной диссертационной работы разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов. Под словом «реки» в контексте исследования понимается сочетание определенных гидравлических условий. Классификация основана на ограниченных данных измерений, достоверность которых признается автором.

Равнинные реки разделены по числу Фруда, с учетом глубины, уклона и крупности донных отложений на две категории:

- равнинные реки с $Fr < 0,2$ (крупные реки),
- равнинные реки с $0,2 \leq Fr \leq 0,5$.

Горно-предгорные реки разделены по форме транспорта донных наносов:

- с грядовой формой транспорта донных наносов, когда соблюдаются условия [33, 36]:
 - при гранулометрическом составе, близком к однородному – ситуация срыва отмостки ($\frac{d_{90}}{d_{10}} \leq 4$): $\frac{H}{d_{90}} > 15 \dots 17, \frac{V}{V_0} < 4$,
 - при разнородном грансоставе: $\frac{H}{d} \geq 30, \frac{V}{V_0} < 4$.
- с бесструктурной формой транспорта донных наносов.

Классификация носит неполный характер, так как основана на ограниченных данных измерений. Подробное описание данных приводится ниже.

2.2 Исходные данные

2.2.1 Равнинные реки

Ввиду недостоверности измерений, получаемых донными батометрами, доказанной в 1954 г. Г.И. Шамовым, и отсутствием в мире измерений в равнинных реках объемным методом, основой для проверки методов расчета расхода донных наносов для равнинных рек послужили натурные данные, измеренные методом повторного продольного эхолотирования речного русла. В отличие от батометрического метода, преумножающего результаты в 2,5-50 раз [58],

погрешность данного метода измерений находится в пределах 30-50% [66]. В процессе измерений указанным методом фиксировались высота и скорость перемещения (деформации) донных гряд. При этом выбирались гряды устойчивого профиля, т.е. такие, геометрические (высота, длина) и динамические (скорость перемещения) характеристики которых в процессе производства измерений оставались постоянными. С целью обеспечения репрезентативности исходных данных большая часть измерений взята из архива ГГИ (11 рек), также использованы японские данные по р. Хии [131]. Нужно отметить, что настоящие материалы наблюдений представляют собой не осредненные характеристики по участку эхолотирования, а данные по конкретным грядам устойчивого профиля типа дюн длиной $(2-8)H$. Полученный массив данных состоит из 200 измерений расхода донных наносов. В соответствии с принятой классификацией эти данные разделены на 2 категории.

Первая категория, к которой отнесены крупные реки, с числом Фруда $Fr < 0,2$, уклонами $0,000069 \leq I \leq 0,000195$ и глубинами $2,90 \leq H \leq 13,7$ м при среднем размере донных отложений $0,3 \leq d \leq 2,9$ мм содержит 105 измерений расхода донных наносов:

- Дон (8 измерений),
- Иртыш (6 измерений),
- Днепр (11 измерений),
- Кама (5 измерений),
- Белая (7 измерений),
- Вычегда (22 измерения),
- Волга – два участка (33 и 13 измерений соответственно).

Вторая категория с числом Фруда $0,2 \leq Fr \leq 0,5^1$, уклонами диапазона $0,000270 \leq I \leq 0,001660$, глубинами $0,20 \leq H \leq 5,40$ м и с донными отложениями размером $0,26 \leq d \leq 7,5$ мм вмещает 95 измерений расхода донных наносов:

- Ануй (5 измерений),
- Лосиха (11 измерений),
- Тогоул (16 измерений),
- Полометь (45 измерений),
- Хии – три участка (10, 4 и 4 измерения соответственно).

Подробное описание всех указанных данных приведено в таблицах приложения В.1 и В.2. В таблицах 2.1 и 2.2 даны диапазоны основных гидравлических характеристик и их производных для каждого объекта. На рисунке 2.1 показано расположение на графике Шильдса тех данных, для которых имеются измерения уклона. Как видно из этого рисунка, все данные

¹ На р. Лосихе в двух измерениях из 11 $Fr < 0,2$, но это не нарушает общей картины (см. таблицу В.2).

относятся к случаю интенсивного транспорта донных наносов, так как располагаются не ниже значения $\theta = 0,1$, а точки, соответствующие равнинным рекам первой категории (Днепр, Волга) и реке второй категории Лосихе, лежат в промежутке $\theta = 0,5 \dots 3$.

Таблица 2.1 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд по данным измерений в равнинных реках первой категории

Характеристика	Р. Дон	Р. Иртыш	Р. Днепр	Р. Кама	Р. Белая	Р. Вычегда	Р. Волга (1966)	Р. Волга (1974)	Р. Парана (1983)	Р. Парана (1992)	Общее (без учета р. Параны)
Глубина потока H , м	2,9-5,15	11-13,5	5-9,5	12,2-13,7	11,3-12,9	3-7,25	4,3-6,1	7-13,5	22,1-24,6	20,9-24,5	2,9-13,7
Скорость потока V , м/с	0,72-1	0,99-1,12	0,8-1,15	1,6-2,1	1,41-1,83	0,85-1,2	0,86-0,97	0,9-1,2	1,38-1,69	1,19-1,66	0,72-2,1
Уклон водной поверхности I^2	0,000069	–	–	–	–	–	0,000130-0,000195	–	–	–	0,000069-0,000195
Крупность донных отложений d , мм	0,3-0,45	0,36-0,36	0,4-0,5	0,41-0,73	0,6-2,9	0,3	0,22-0,35	0,35	0,405	0,405	0,3-2,9
Высота гряд h_g , м	0,31-0,66	1,1-1,75	0,7-1,2	1,1-2	0,95-1,75	0,4-1	0,4-0,9	0,5-1,4	3,7-5,52	1,76-4,62	0,31-1,75
Длина гряд l_g , м	–	25-34	–	18-120	22-38	15-40	–	–	296-498	88,4-270	15-120
Скорость перемещения гряд C_g , м/сут	4-9	4,7-7,6	3-6,7	5,6-24	11-55	2-8	0,96-7,92	1,81-7,95	–	–	0,96-55
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	0,12-0,15	0,09-0,11	0,09-0,14	0,15-0,19	0,13-0,17	0,10-0,17	0,12-0,14	0,09-0,12	0,09-0,11	0,08-0,11	0,09-0,19
Неразмывающая скорость V_0 , м/с	0,55-0,63	0,72-0,75	0,62-0,72	0,75-0,78	0,77-0,96	0,55-0,66	0,59-0,63	0,66-0,75	0,84-0,86	0,83-0,85	0,55-0,96
$\frac{H}{d}$	8314-12667	30556-37500	12500-19000	16986-31951	3897-21500	10000-24167	14857-26136	20000-38571	54642-60840	51580-60370	3897-38571

² Уклон измерялся не на всех реках.

Характеристика	Р. Дон	Р. Иртыш	Р. Днепр	Р. Кама	Р. Белая	Р. Вычегда	Р. Волга (1966)	Р. Волга (1974)	Р. Парана (1983)	Р. Парана (1992)	Общее (без учета р. Параны)
$\frac{h_r}{H}$	0,082-0,135	0,081-0,135	0,105-0,154	0,090-0,161	0,081-0,138	0,071-0,167	0,077-0,188	0,065-0,200	0,164-0,224	0,083-0,196	0,065-0,200
$\frac{h_r}{d}$	816-1467	3056-4861	1750-2500	2558-3261	328-2917	1333-3333	1333-3636	1429-4000	9136-13630	4346-11407	328-4861
$\frac{l_r}{H}$	–	2,05-2,62	–	1,43-9,68	1,72-3,36	2,27-8,33	–	–	12,6-22,5	4,18-11,8	1,43-8,33
$\frac{V}{V_0}$	1,28-1,59	1,31-1,55	1,25-1,73	2,14-2,78	1,82-2,16	1,31-1,94	1,42-1,60	1,33-1,66	1,65-1,99	1,43-1,96	1,25-2,78
$\frac{C_r}{V}$	0,00005-0,00012	0,00005-0,00009	0,00003-0,00008	0,00004-0,00013	0,00008-0,00035	0,00002-0,00008	0,00001-0,00010	0,00002-0,000094	–	–	0,00001-0,00035
Примечание – На всех реках гранулометрический состав был близким к однородному. В качестве характеристики грансостава использовался средний взвешенный диаметр d (для р. Хии (таблица 2.2) японские авторы дают d_{50} , но в силу равной подвижности донных отложений равнинных рек это существенного значения не имеет).											

Таблица 2.2 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд по данным измерений в равнинных реках второй категории

Характеристика	Р. Ануй	Р. Лосиха	Р. Тогул	Р. Полометь	Р. Хии			Общее
					Игайя	Курихара	Надабун	
Глубина потока H , м	1,8-2,2	1,45-2,3	3,3-5,4	0,3-2,5	0,208-0,732	0,202-0,454	0,705-1,033	0,202-5,4
Скорость потока V , м/с	1,3-1,4	0,61-1,62	1,2-1,76	0,45-1,71	0,58-0,93	0,63-0,803	0,788-0,896	0,45-1,76
Уклон водной поверхности I	–	0,000270-0,000330	–	0,000320-0,001120	0,000840-0,001530	0,000890-0,001660	0,001420-0,001530	0,000270-0,001660
Крупность донных отложений d , мм	0,64-4,9	0,26-0,31	1-1,4	0,6-7,5	1,44	1,33	1,1	0,26-7,5

Характеристика	Р. Ануй	Р. Лосиха	Р. Тогул	Р. Полометь	Р. Хи			Общее
					Игайя	Курихара	Надабун	
Высота гряд h_r , м	0,4-0,6	0,48-1	0,3-0,5	0,03-1	0,0145-0,138	0,042-0,075	0,174-0,252	0,0145-1
Длина гряд l_r , м	8-15	11-21	4-9,5	–	0,795-2,84	1,12-1,59	2,13-2,87	0,795-21
Скорость перемещения гряд C_r , м/сут	36-55,2	17,8-48	12-35,8	25,92-128	60,5-146	73,4-131	43,2-94,2	12-146
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	0,28-0,33	0,13-0,37	0,2-0,26	0,24-0,42	0,3-0,42	0,32-0,5	0,28-0,31	0,13-0,5
Неразмывающая скорость V_0 , м/с	0,54-0,76	0,47-0,52	0,62-0,69	0,38-0,87	0,38-0,49	0,37-0,44	0,46-0,5	0,37-0,87
$\frac{H}{d}$	429-3125	5577-8269	2571-5400	333-1609	144-508	152-341	641-939	144-8269
$\frac{h_r}{H}$	0,18-0,3	0,24-0,54	0,09-0,15	0,1-0,54	0,07-0,19	0,14-0,21	0,2-0,35	0,07-0,54
$\frac{h_r}{d}$	89-938	1667-3704	300-500	33-870	10,1-95,8	31,6-56,4	158-229	10,1-3704
$\frac{l_r}{H}$	3,81-8,33	6,05-11,05	0,89-2,64	–	1,92-3,88	2,62-5,94	2,58-3,25	0,89-11,05
$\frac{V}{V_0}$	1,71-2,45	1,19-3,18	1,81-2,65	1,16-2,74	1,44-1,96	1,49-1,89	1,7-1,84	1,16-3,18
$\frac{C_r}{V}$	0,0003-0,00049	0,00017-0,00059	0,00012-0,00035	0,00033-0,00102	0,00087-0,00291	0,0013-0,0022	0,0006-0,0012	0,00012-0,00291

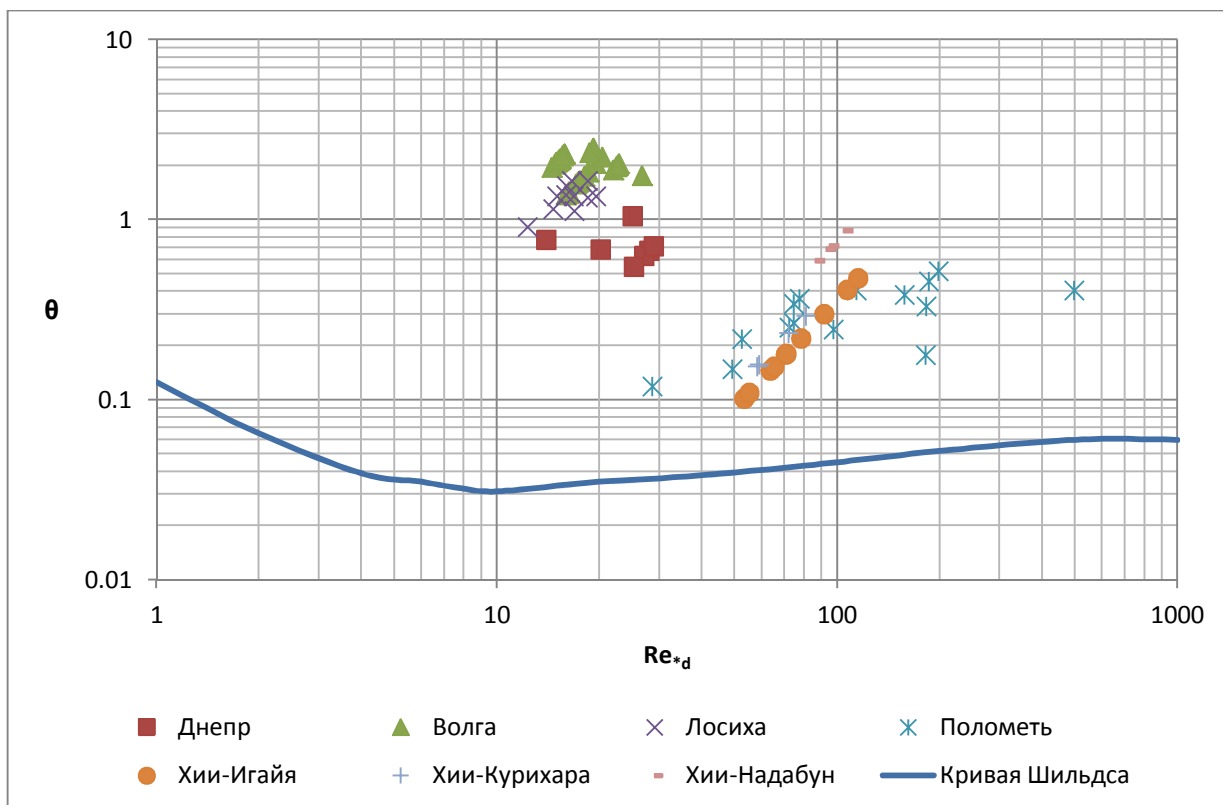


Рисунок 2.1 – Степень подвижности донных наносов в измерениях на равнинных реках относительно кривой Шильдса

2.2.2 Горно-предгорные реки

Для апробации методов расчета применительно к условиям горно-предгорных рек, в силу технической невозможности измерений в них в многоводный период, когда и происходит активный транспорт донных наносов, использованы лабораторные данные. В соответствии с приведенной классификацией они разделены по форме транспорта наносов.

2.1.2.1 Грядовое движение

Блок данных по грядовому движению донных наносов в горно-предгорных реках состоит из измерений, полученных в ходе 6 экспериментов в лотках и 4 на размываемых гидравлических моделях участков горно-предгорных рек. Полное описание экспериментов приведено в таблице В.3. Массив данных составляют 220 измерений. На сегодня это все данные по грядовому движению крупных наносов, в которых характеристики гряд зафиксированы. В этих данных расход донных наносов получен через характеристики гряд, как для равнинных рек. В рассматриваемых экспериментах гранулометрический состав донных отложений был как однородным (часть измерений З.Д. Копалиани в 8-метровом лотке, часть измерений В.Н. Гончарова, данные Х.П. Гая, Д.Б. Саймонса и И.В. Ричардсона), так и условно однородным

$\left(\frac{d_{90}}{d_{10}} \leq 4\right)$ (остальные данные), но, к сожалению, гранулометрические кривые есть только для двух из них: эксперимента З.Д. Копалиани в 30-метровом лотке и экспериментов Г.П. Уильямса. Для всех остальных случаев имеются данные только по средневзвешенному диаметру d (Гай, Саймонс и Ричардсон характеризуют свои данные через d_{50}). Краткая информация об использованных данных представлена в таблице 2.3. На рисунке 2.2 показано расположение этих данных на графике Шильдса (кроме экспериментов Гончарова, для которых отсутствуют измерения уклона). Как следует из указанных таблицы и рисунка, экспериментальными исследованиями грядового движения крупных наносов в целом охвачен широкий диапазон гидравлических характеристик и интенсивности транспорта донных наносов вплоть до значений безразмерного критерия Шильдса $\theta \leq 1$, в пределах которых транспорт донных наносов происходит в виде донного влечения. В пересчете на натуру возможно представить только данные по рекам Хара-Мурина, Утулика и Аносовке. Диапазон основных гидравлических характеристик в экспериментах по этим рекам следующий: $1,00 \leq H \leq 5,25$ м, $2,83 \leq V \leq 5,89$ м/с, $0,075 \leq d \leq 0,310$ м, $0,005 \leq I \leq 0,007$, $0,53 \leq Fr \leq 1,05$, $0,30 \leq h_r \leq 1,50$ м, $0,016 \leq C_r \leq 0,103$ м/с, $9 \leq \frac{H}{d} \leq 26$, $0,09 \leq \frac{h_r}{H} \leq 0,50$, $1,20 \leq \frac{h_r}{d} \leq 8,00$.

Таблица 2.3 – Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд в экспериментах по грядовому движению крупных наносов

Характеристика	Диапазон изменения										
	Опыты З.Д. Копалиани						В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	Весь массив данных
	8-м лоток	30-м лоток	р. Ньюжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка					
Количество измерений	17	14	17	21	11	2	34	49	42	13	220
Ширина лотка B , м	0,21	0,50	–	–	–	–	0,50	0,075-1,19	–	2,44	0,075-2,44
Глубина потока H , м	0,049-0,145	0,130-0,265	0,070-0,170	0,038-0,070	0,030-0,060	0,020-0,035	0,070-0,112	0,088-0,225	0,100-0,200	0,140-0,338	0,020-0,338
Скорость потока V , м/с	0,56-0,92	1,00-1,45	0,40-0,60	0,35-0,68	0,47-0,68	0,40-0,42	0,51-0,71	0,46-1,08	0,64-1,34	0,55-0,95	0,35-1,45
Крупность донных отложений d , м	0,0011-0,0015	0,0065-0,0065	0,0006-0,0020	0,0024-0,0041	0,0025-0,0041	0,0015-0,0021	0,0017-0,0024	0,0014-0,0014	0,0013-0,0035	0,0009-0,0009	0,0006-0,0065
Уклон водной поверхности I	0,003-0,006	0,003-0,01	0,006	0,006	0,005	0,007	0,001-0,003	0,0006-0,01	–	0,0004-0,004	0,0004-0,01
Элементарный расход воды q , м ³ /с/м	0,029-0,104	0,130-0,300	0,029-0,102	0,016-0,043	0,014-0,038	0,008-0,015	0,036-0,079	0,041-0,230	0,064-0,268	0,080-0,263	0,008-0,300
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	0,56-0,89	0,66-1,05	0,34-0,57	0,53-1,01	0,75-1,05	0,72-0,90	0,56-0,72	0,34-0,82	0,65-1,26	0,35-0,58	0,34-1,26
Высота гряд h_r , м	0,006-0,024	0,015-0,050	0,010-0,065	0,005-0,020	0,005-0,015	0,010-0,010	0,008-0,021	0,012-0,055	0,010-0,050	0,018-0,104	0,005-0,104

Характеристика	Диапазон изменения										
	Опыты З.Д. Копалиани						В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	Весь массив данных
	8-м лоток	30-м лоток	р. Ньюжа	р. Харамурин	р. Утулик	р. Аносовка					
Длина гряд l_r , м	0,180-0,630	0,600-1,050	0,450-1,000	–	–	–	0,400-0,880	0,400-2,710	0,220-0,750	0,884-2,236	0,18-2,71
Скорость перемещения гряд C_r , м/с	0,00200-0,00990	0,00800-0,03070	0,00027-0,00290	0,00250-0,01000	0,00250-0,01330	0,00230-0,00400	0,00170-0,00610	0,00015-0,01170	0,00220-0,03760	0,00075-0,00674	0,00015-0,0376
Элементарный расход донных наносов в плотном теле q_T , м ³ /с/м	0,000011-0,000092	0,000079-0,000569	0,000007-0,000049	0,000009-0,000044	0,000014-0,000065	0,000010-0,000018	0,000007-0,000042	0,000001-0,000196	0,000018-0,000733	0,000008-0,000187	0,000001-0,000733
Динамическая скорость V_* , м/с	0,04-0,09	0,06-0,14	0,06-0,10	0,05-0,06	0,04-0,06	0,04-0,05	0,03-0,05	0,04-0,15	–	0,03-0,11	0,03-0,15
Число Рейнольдса по динамической скорости $Re_{*d} = \frac{v_* d}{\nu}$	38-95	307-686	30-126	89-175	82-161	56-59	36-92	36-150	–	24-77	24-686
$\frac{H}{d}$	43-127	20-41	48-145	9-26	10-19	10-23	35-65	65-167	29-80	151-364	9-364
$\frac{h_r}{H}$	0,10-0,21	0,09-0,24	0,08-0,56	0,09-0,50	0,10-0,43	0,29-0,50	0,09-0,20	0,09-0,56	0,10-0,41	0,11-0,35	0,08-0,56

Характеристика	Диапазон изменения										
	Опыты З.Д. Копалиани						В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	Весь массив данных
	8-м лоток	30-м лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка					
$\frac{h_r}{d}$	5,3-16,6	2,3-7,7	8,5-72,2	1,2-8,0	1,6-6,0	4,8-6,7	3,8-11,8	8,9-40,7	3,1-27,3	19,7-111,4	1,2-111,4
$\frac{l_r}{H}$	2,92-7,69	3,59-5,33	4,13-9,09	–	–	–	4,09-10,24	3,27-30,11	2,20-7,50	3,46-10,35	2,20-30,11
$\frac{C_r}{V}$	0,0030-0,0173	0,0070-0,0212	0,0007-0,0055	0,0069-0,0173	0,0048-0,0213	0,0055-0,0100	0,0029-0,0089	0,0003-0,0148	0,0031-0,0301	0,0012-0,0071	0,0003-0,0301
$\frac{V^*}{w}$	0,34-0,59	0,16-0,35	0,33-0,94	0,15-0,24	0,15-0,21	0,16-0,27	0,13-0,21	0,22-0,92	–	0,33-1,04	0,13-1,04

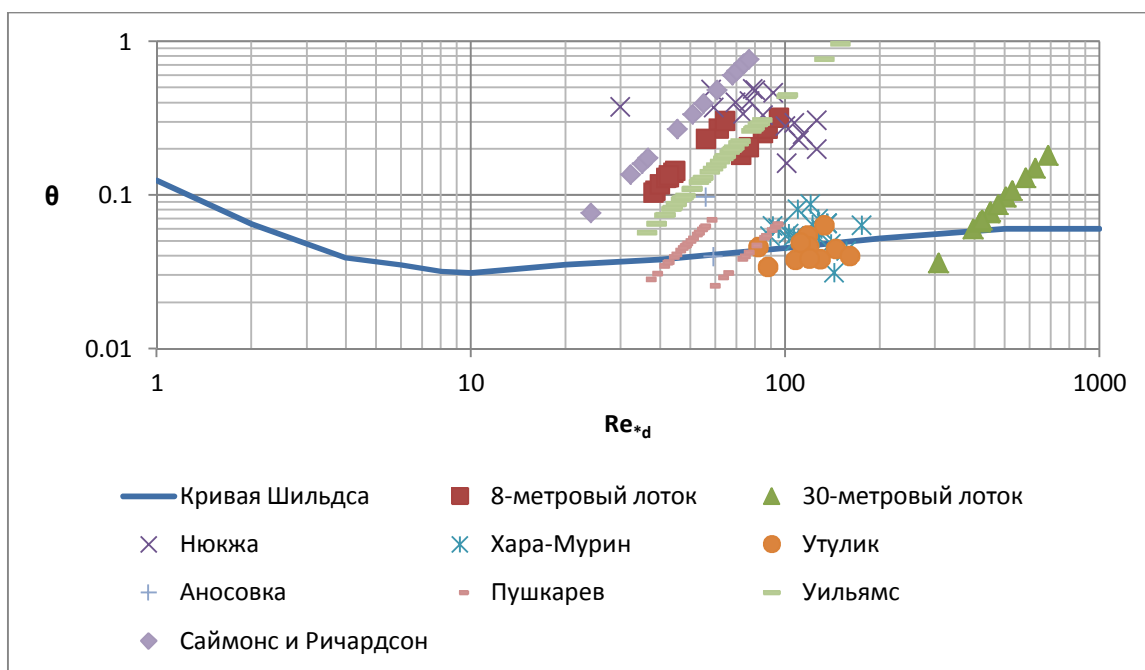


Рисунок 2.2 – Степень подвижности донных наносов в экспериментах по грядовому движению крупных наносов относительно кривой Шильдса

2.1.2.2 Бесструктурный транспорт

Исходным материалом по бесструктурному транспорту донных наносов в горно-предгорных реках послужили данные трех экспериментов, проведенных в Русловой лаборатории ГГИ. Во всех трех экспериментах моделировался подъем паводка. Для проверки формул выбраны именно эти измерения, так как именно они из всей совокупности существующих сегодня в литературе наилучшим образом гидравлически соответствуют условиям горно-предгорных рек. Прочие имеющиеся в литературе измерения в лотках по гидравлическим характеристикам соответствуют горным ручьям и водопадам [94]. Первые два эксперимента поставлены А.С. Чеботаревым в 8-метровом гидравлическом лотке специально для настоящего исследования, третий эксперимент – это архивные данные, полученные в 100-метровом лотке [42].

Прототипами первого и второго экспериментов послужили два участка р. Мзымты (Черноморское побережье Северного Кавказа). Для первого участка Мзымты эксперимент проводился в масштабе 1:80, для второго – в масштабе 1:55. Гидравлические характеристики этих экспериментов представлены в таблице 2.4. Все расчеты производились в единицах природы, при этом результаты первого эксперимента были пересчитаны в масштабных коэффициентах второго эксперимента (1:55). Отличительной особенностью этих экспериментов является то, что грансостав определялся не только для грунта, подаваемого в лоток, но и для наносов, попадавших в песколовку при каждом фиксируемом расходе воды.

Таблица 2.4 – Гидравлические характеристики первого и второго экспериментов по бесструктурному транспорту крупных наносов (единицы натуры)

H , м	V , м/с	Fr	Q , м ³ /с	q , м ² /с	Q_T , м ³ /с	q_T , м ² /с	Q_T , кг/с	q_T , кг/м/с	$\frac{Q_T}{Q}$, м ³ /м ³	$\frac{Q_T}{Q}$, кг/м ³	$\rho_{\text{рыхл}}$, кг/м ³
Глубина	Скорость течения	Число Фруда	Расход воды	Расход воды на единицу ширины русла	Объемный расход донных наносов	Объемный расход донных наносов на единицу ширины русла	Массовый расход донных наносов	Массовый расход донных наносов на единицу ширины русла	Объемная концентрация	Весовая концентрация	Плотность наносов в рыхлом теле
Первый эксперимент, уклон $I = 0,0074$											
0,96	1,79	0,58	28,6	1,70	0,0003	0,00002	0,91	0,05	0,00001	0,03	1438
1,36	2,33	0,64	52,7	3,13	0,0022	0,00013	5,72	0,34	0,00004	0,11	1540
1,60	3,22	0,81	85,9	5,11	0,079	0,0047	209	12,4	0,00092	2,43	1701
2,32	4,30	0,90	166	9,88	0,208	0,012	551	32,8	0,00125	3,32	1653
2,72	5,25	1,02	238	14,1	0,387	0,023	1025	61,0	0,00163	4,31	1764
3,36	5,53	0,96	309	18,4	0,537	0,032	1423	84,7	0,00174	4,60	1754
3,84	6,27	1,02	401	23,9	1,067	0,063	2827	168	0,00266	7,05	1700
Второй эксперимент, уклон $I = 0,013$											
0,83	2,38	0,84	22,4	1,94	0,0021	0,000180	2,60	0,22	0,00004	0,12	1250
0,99	2,87	0,92	32,5	2,82	0,0119	0,001027	16,01	1,39	0,00019	0,49	1350
1,38	3,85	1,05	60,6	5,24	0,0977	0,008456	148,45	12,85	0,00092	2,45	1520

H , м	V , м/с	Fr	Q , м ³ /с	q , м ² /с	Q_T , м ³ /с	q_T , м ² /с	Q_T , кг/с	q_T , кг/м/с	$\frac{Q_T}{Q}$, м ³ /м ³	$\frac{Q_T}{Q}$, кг/м ³	$\rho_{T\text{рыхл}}$, кг/м ³
Глубина	Скорость течения	Число Фруда	Расход воды	Расход воды на единицу ширины русла	Объемный расход донных наносов	Объемный расход донных наносов на единицу ширины русла	Массовый расход донных наносов	Массовый расход донных наносов на единицу ширины русла	Объемная концентрация	Весовая концентрация	Плотность наносов в рыхлом теле
1,87	4,51	1,05	96,5	8,35	0,1537	0,013308	236,71	20,49	0,00093	2,45	1540
2,15	5,03	1,10	123,4	10,68	0,2874	0,024886	431,15	37,33	0,00132	3,49	1500
2,48	5,55	1,13	157,0	13,60	0,3945	0,034153	603,53	52,25	0,00145	3,84	1530

В первом эксперименте гранулометрический состав был неоднородным ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 29$), во втором – близкий к однородному ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 2$). На рисунках 2.3 и 2.4 представлены кривые грансоставов донных наносов на каждой стадии паводка вместе с исходными кривыми донных отложений (исходные грунты). Кривые второго эксперимента на всех стадиях очень близки к исходной, в первом эксперименте разброс значительно больший. Грансостав второго эксперимента соответствует условию, когда мелкие частицы удалены предыдущим, менее сильным паводком, и сформировалась отмостка дна. Совмещенные интегральные кривые с основными параметрами грансоставов донных отложений первого и второго экспериментов представлены на рисунке 2.5. На этом рисунке грансостав первого эксперимента дан в масштабных коэффициентах второго эксперимента.

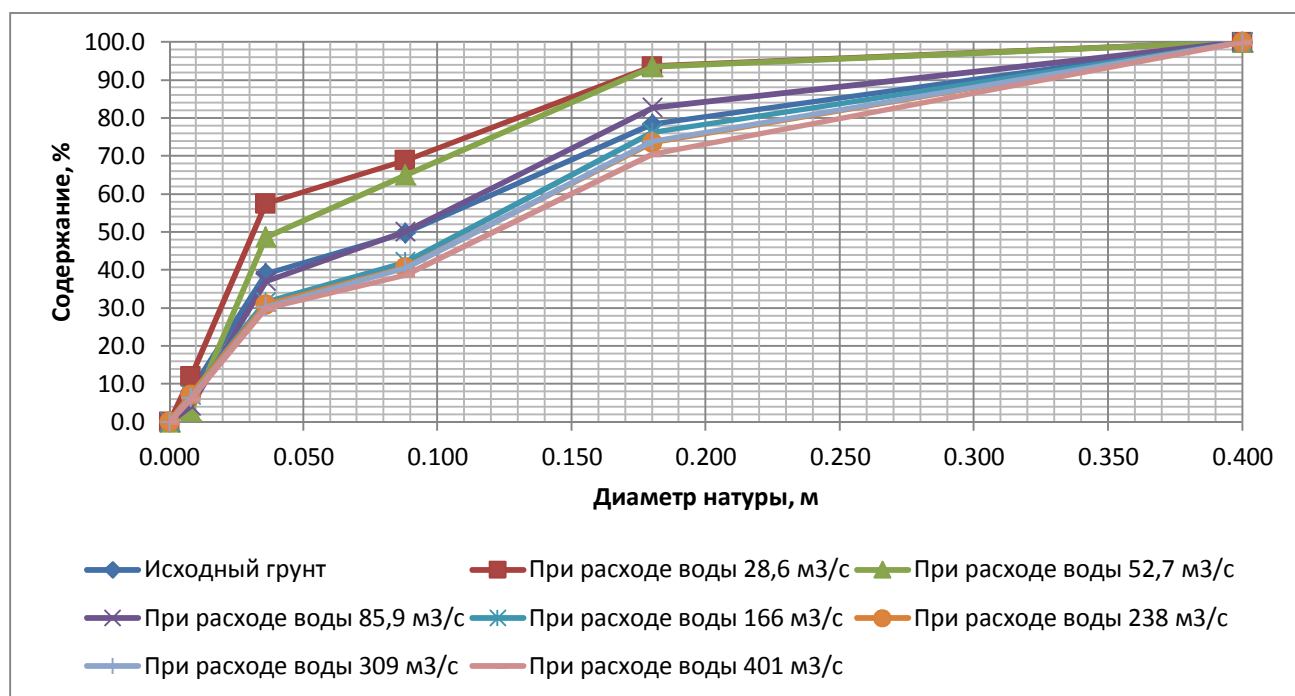


Рисунок 2.3 – Совмещенные интегральные кривые гранулометрического состава донных наносов каждой стадии паводка и исходной кривой донных отложений. Первый эксперимент (пересчет на натуру)

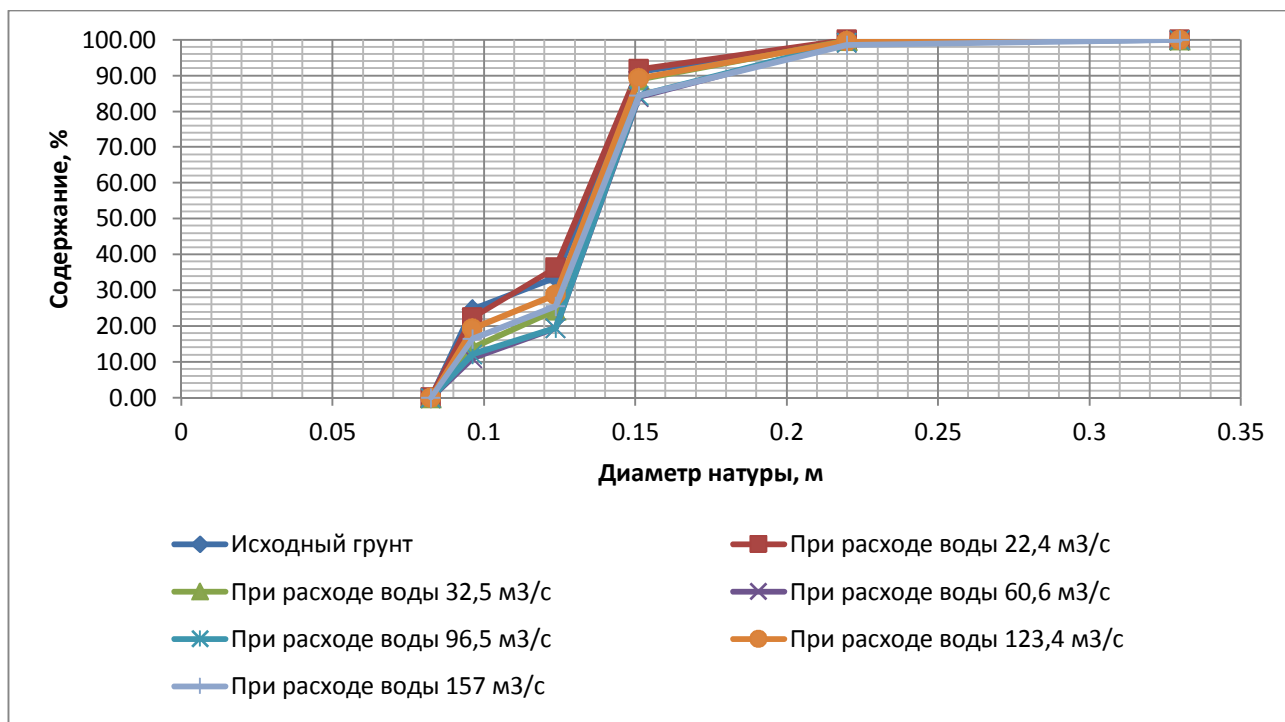


Рисунок 2.4 – Совмещенные интегральные кривые гранулометрического состава наносов каждой стадии паводка и исходной кривой донных отложений. Второй эксперимент (пересчет на натуру)

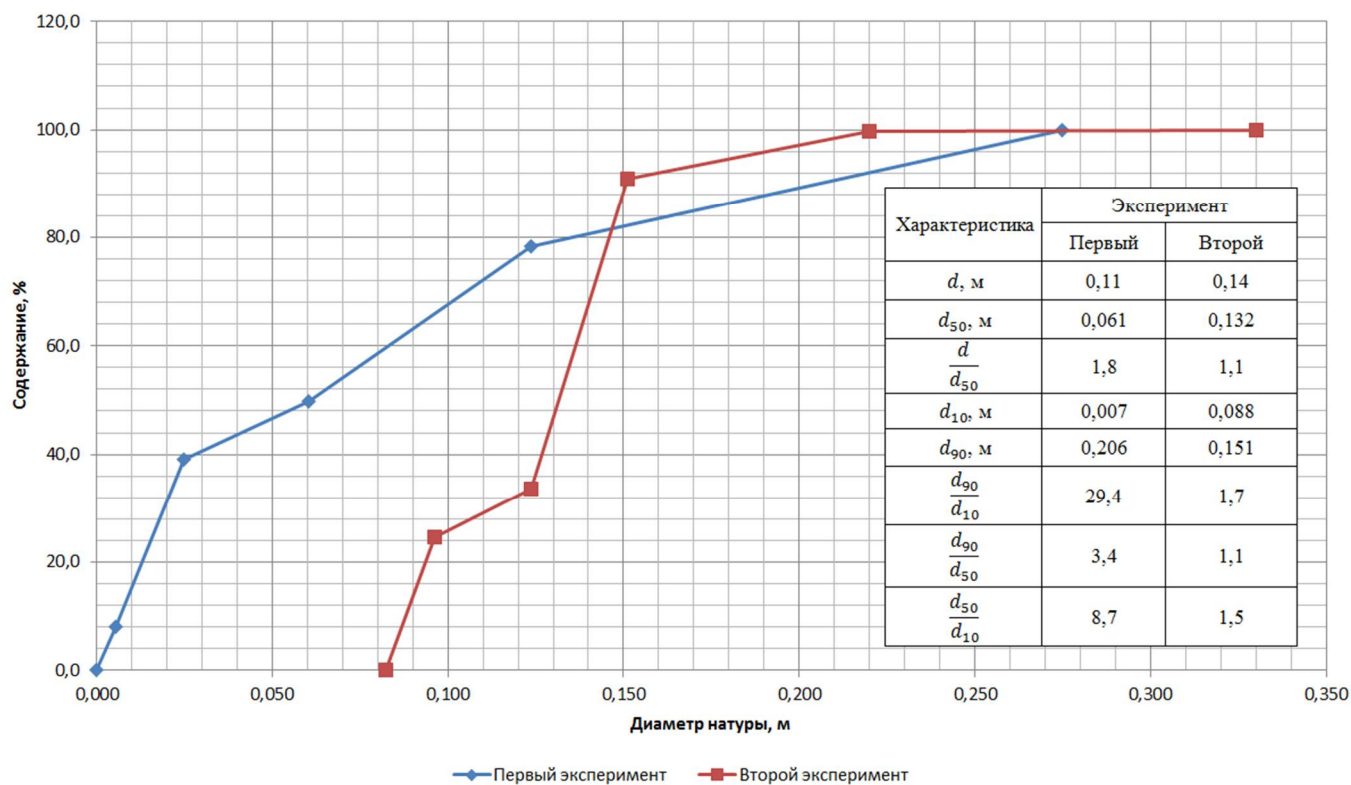


Рисунок 2.5 – Совмещенные интегральные кривые гранулометрического состава донных отложений первого и второго экспериментов с основными параметрами донного материала

Третий эксперимент был проведен для условий р. Туапсе [42] (гидравлические характеристики представлены в таблице В.4). Расчеты по третьему эксперименту производились в единицах модели. В нем, как и в первом эксперименте, гранулометрический состав был неоднородным ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 12$). Бесструктурный транспорт донных наносов поддерживался со 2-й по 12-ю стадии паводка.

В третьем эксперименте измерения грансостава на каждой стадии паводка не проводились, поэтому имеются данные только по исходному грунту (донным отложениям). Интегральная кривая донных отложений третьего эксперимента с основными параметрами грансостава приведена на рисунке 2.6.

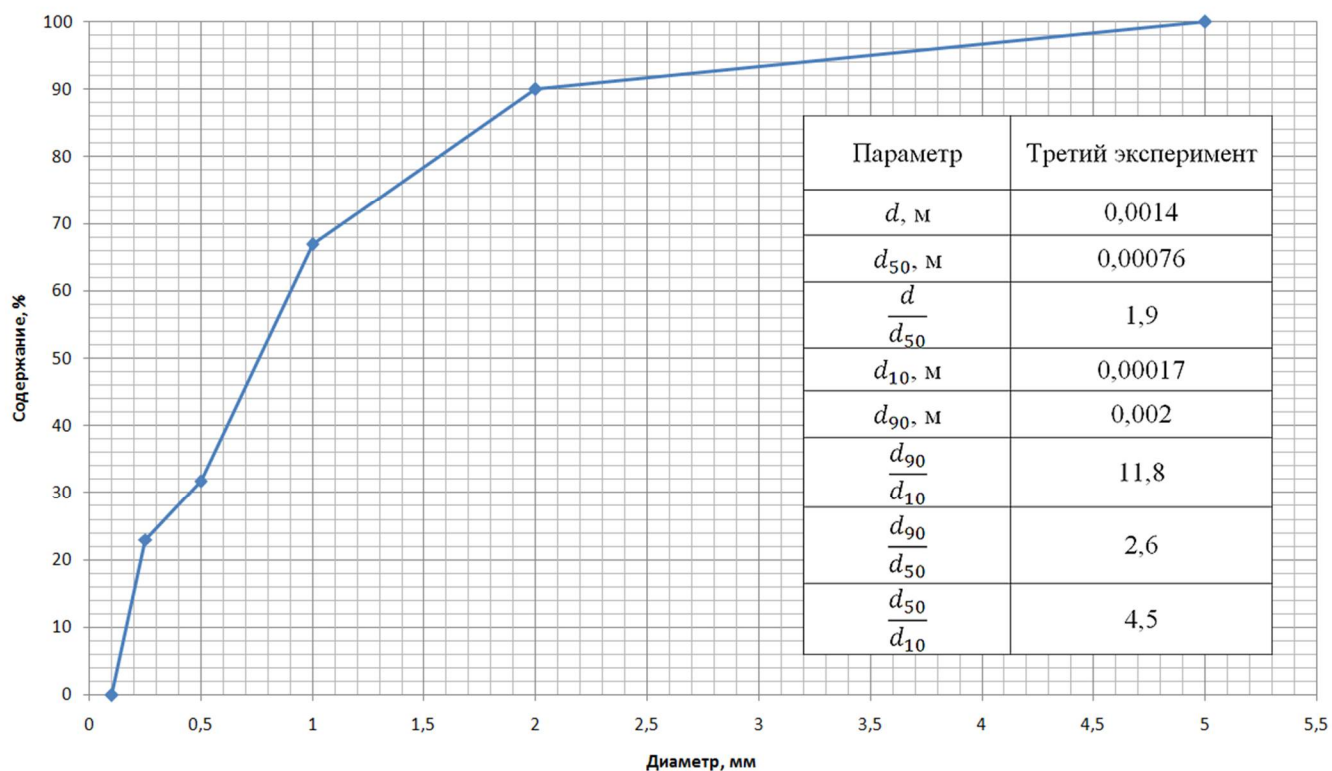


Рисунок 2.6 – Интегральная кривая гранулометрического состава донных отложений третьего эксперимента с основными параметрами донного материала (единицы модели)

На рисунке 2.7 в единицах природы представлено расположение первого и второго экспериментов относительно кривой Шильдса (при расчетах с грансоставом исходного грунта и с грансоставом наносов), на рисунке 2.8 – третьего эксперимента (в единицах модели).



Рисунок 2.7 – Степень подвижности донных наносов в первом и втором экспериментах по бесструктурному транспорту относительно кривой Шильдса при расчетах с исходным грансоставом донных отложений и грансоставами наносов

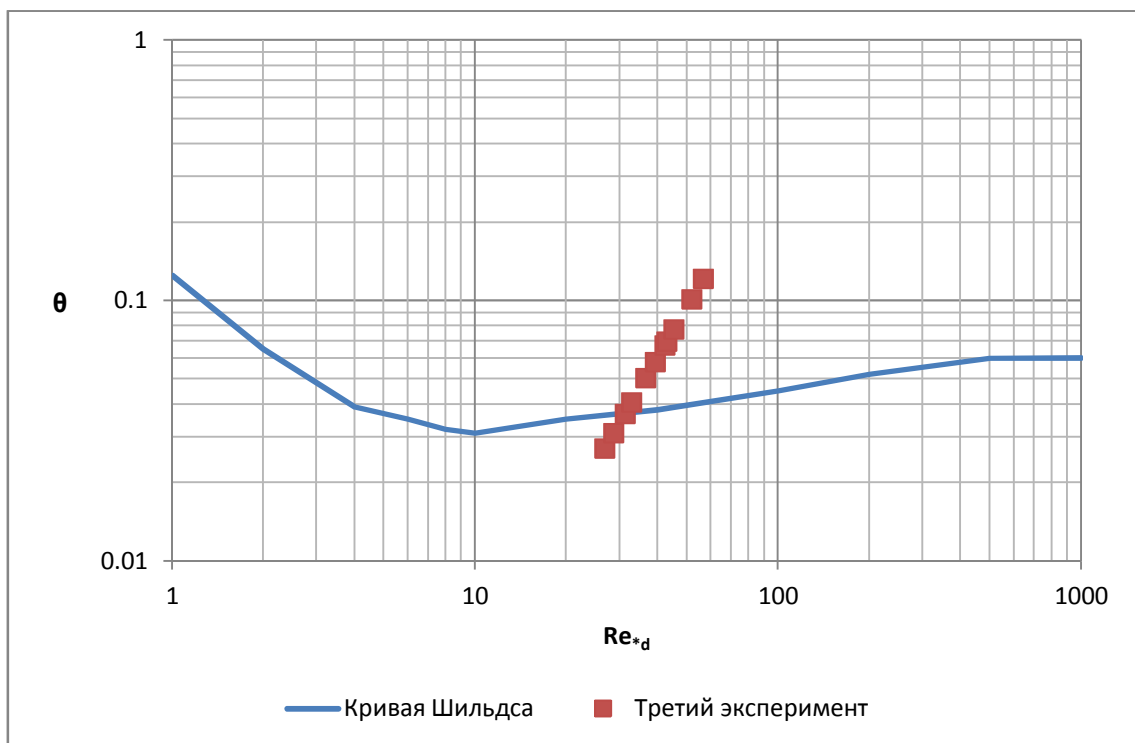


Рисунок 2.8 – Степень подвижности донных наносов в третьем эксперименте по бесструктурному транспорту относительно кривой Шильдса

2.3 Методика апробации формул

Третья и четвертая главы диссертации посвящены последовательной проверке собранных формул на основе выбранных достоверных данных, сгруппированных в соответствии с указанной выше гидравлической классификацией.

В третьей главе, посвященной равнинным рекам, путем аппроксимации данных для рек первой категории получена формула высоты гряд. Далее для каждой категории рек проверялись формулы высоты и скорости гряд, а затем путем их компиляции проверялась эффективность расчета расхода донных наносов. Расход донных наносов вычислялся для двух условий: наличия измеренных данных по высоте гряд, когда вычислялась только их скорость, и отсутствия измерений h_r , когда обе величины рассчитывались. При расчетах неразмывающая скорость V_0 определялась по формуле В.Н. Гончарова [11], гидравлическая крупность w – по зависимостям В.В. Романовского [31]. В случае, если авторы проверяемых формул предлагают собственные формулы для V_0 и w , расчет производился также и по ним. Ввиду отсутствия данных по уклону свободной поверхности для большинства рек, коэффициент сопротивления Шези для формул А.Ш. Барекяна и В.С. Кнороза рассчитывался по формуле Г.Л. Гладкова [107]. Оценка формул высоты, скорости гряд и расхода наносов осуществлялась вычислением относительной погрешности: $\Delta = \frac{|X_{\text{расч}} - X_{\text{изм}}|}{X_{\text{изм}}} 100\%$. Для практических расчетов рекомендовались формулы высоты гряд со средней погрешностью до 50%, для скорости гряд и расхода донных наносов – с погрешностями до 60%.

Параграф 3.4 посвящен проверке формул расхода донных наносов, не учитывающих гряды в явном виде. Особое внимание уделено проверке эффективности значений критического касательного напряжения, предлагаемых разными авторами. Каждая формула, имеющая в своем составе θ_0 , проверялась при следующих значениях этого параметра: по автору (если он предлагал собственное значение) или 0,06 – по Шильдсу и 0,03 – по Копалиани [37]. Для оценки точности формул использовалось выражение: $\Delta = \frac{q_{\text{тр расч}}}{q_{\text{тр изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$, т.е. занижение или завышение результата расчетов в 2 раза и менее. Затем результат уточнялся через $\Delta = \frac{|q_{\text{тр расч}} - q_{\text{тр изм}}|}{q_{\text{тр изм}}} 100\%$, и к расчетам рекомендовались формулы со средней относительной погрешностью до 60%.

В главе 4 отдельно рассматриваются грядовое и бесструктурное движение донных наносов в горно-предгорных реках. Для грядового движения путем аппроксимации исходных данных выведена формула высоты гряд, и компиляцией ее с формулой скорости гряд Б.Ф. Сниценко и З.Д. Копалиани [73] получена формула расхода донных наносов. Далее

проверялись формулы расхода донных наносов, учитывающие гряды в явном виде. Из всего их набора (таблицы А.1-А.3) для проверки были выбраны полученные для крупных наносов, а также обобщенные формулы, разработанные в разное время в ГГИ без разделения рек на равнинные и горные. Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении этих формул использовалось выражение: $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал:

$0,5 \leq \Delta \leq 2,0$. Затем результат уточнялся через $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$, и к расчетам рекомендовались формулы со средней относительной погрешностью до 60%.

Формулы, не учитывающие гряды в явном виде, проверялись по той же схеме, как и для равнинных рек, но помимо проверки критерия Шильдса, для экспериментов в 30-м лотке З.Д. Копалиани и данных Г.П. Уильямса, для которых имеются гранулометрические кривые, проверялась эффективность поправок на неоднородность грунта. Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении формул использовалась оценка: $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$.

Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$. Затем результат также уточнялся через $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$, и к расчетам рекомендовались формулы со средней относительной погрешностью до 60%.

Для бесструктурного транспорта донных наносов в горно-предгорных реках, в отличие от предыдущих разделов, сопоставлялись не осредненные значения оценок точности расчета, а их конкретные значения отдельно для каждой стадии паводка, характеризующейся своей степенью вовлеченности в движение донных отложений. Для первых двух экспериментов формулы проверялись с использованием гранулометрических данных донных отложений и донных наносов, движущихся на каждой стадии паводка. В формулах, основанных на критерии Шильдса, в качестве характеристики гранулометрического состава использовались средневзвешенный диаметр d и его медианное значение d_{50} , а также иное значение, если таковое предлагалось автором (d_{35} и др.). Также проверялась эффективность различных критических значений коэффициента Шильдса и поправок на неоднородность грунта. Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении формул использовалась оценка: $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$. Затем результат

был также уточнен через $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$.

Глава 3. Расчеты расхода донных наносов при их грядовом движении в равнинных реках

3.1 Расчеты высоты песчаных гряд

Для рек первой категории путем аппроксимации исходных данных получена связь относительной высоты гряд $\frac{h_r}{d}$ с относительной гладкостью потока $\frac{H}{d}$ (рисунок 3.1):

$$h_r = 0,11H \quad (3.1)$$

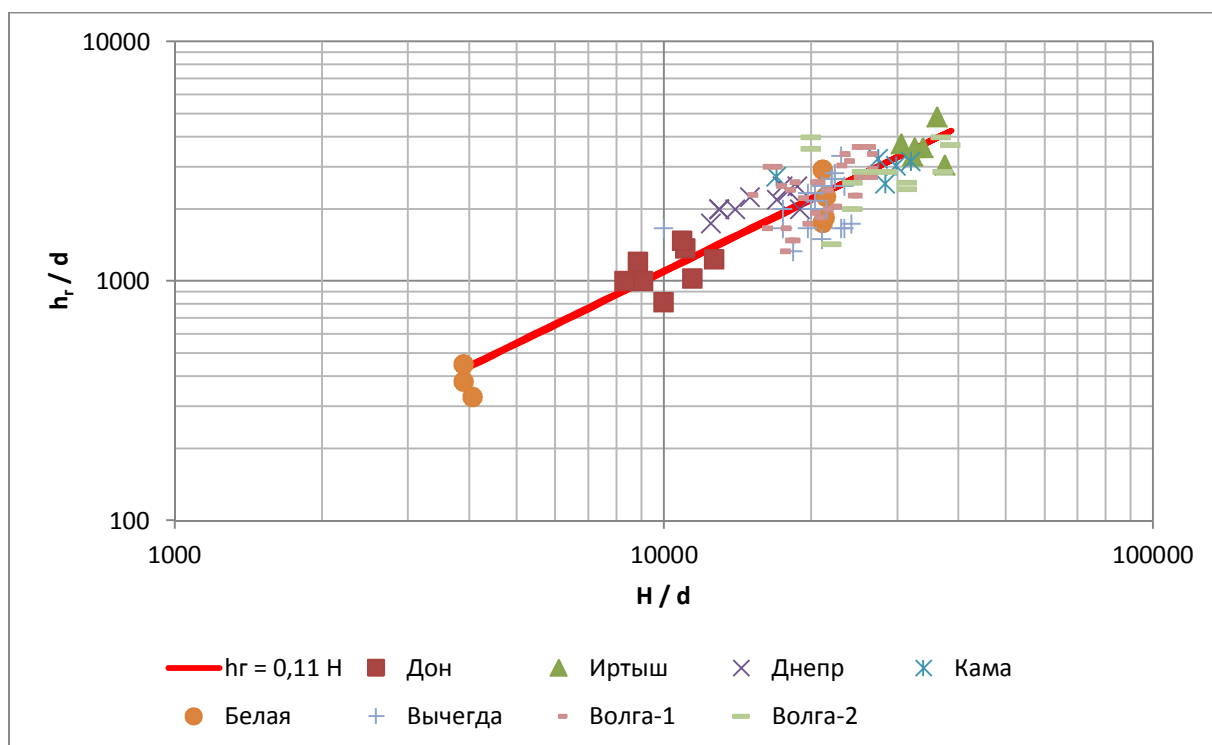


Рисунок 3.1 – Зависимость относительной высоты гряд от относительной гладкости потока для равнинных рек первой категории $\frac{h_r}{d} = 0,11 \frac{H}{d}$, $R^2 = 0,54$, по данным таблицы В.1

Разброс точек на рисунке 3.1, по-видимому, объясняется естественной вариацией значений высоты гряд в зависимости от гидравлических характеристик потока, погрешностью измерений, а также тем обстоятельством, что ряды наблюдений содержат отличающиеся по своему генезису плоские (двухмерные) и трехмерные гряды, образование которых связано с пространственной структурой речных потоков, трудно учитываемой в ходе измерений.

Проверяемые в настоящем разделе формулы представлены в таблице А.1. В таблицах 3.1 и 3.2 приводятся результаты сравнения расчетов высоты гряд по этим формулам с выбранными данными измерений (см. раздел 2.1.1).

Расчет значений высоты гряд осуществлялся с использованием следующих формул.

Неразмывающая скорость определялась по выражению В.Н. Гончарова [11]:

$$V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \quad (3.2)$$

Гидравлическая крупность – по зависимостям В.В. Романовского [31]:

- $d \leq 0,15$ мм (ламинарный режим):

$$w = 0,22 \frac{gd^2}{4\nu} \frac{\rho_T - \rho}{\rho} \quad (3.3)$$

где $\rho_T = 2560$ кг/м³, $\rho = 1000$ кг/м³, при $t = 15$ °С $\nu = 1,156 \cdot 10^{-6}$

- $0,15 < d < 1,5$ мм (переходный режим):

$$w = (1,6\theta - 0,16)(68d - 0,003) \frac{\rho_T - \rho}{\rho} k_T \quad (3.4)$$

где $\theta = 0,8$, $k_T = 1$

- $d \geq 1,5$ мм (турбулентный режим):

$$w = (2,4\theta - 0,7) \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd} \quad (3.5)$$

Таблица 3.1 – Сравнение результатов расчета высоты гряд по различным формулам с данными фактических измерений в реках первой категории

Автор		Оценка точности расчета, %										Средняя оценка, %
		$\Delta = \frac{ h_{г\text{расч}} - h_{г\text{изм}} }{h_{г\text{изм}}} 100\%$										
		Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	Парана (1983) ³	Парана (1992)	
М.Л. Амслер, М.И. Шредер (1998)		–	42	–	188	295	–	–	–	6	10	–
А.Ш. Барекян (1962)	V_0 – по Гончарову	72	63	76	48	55	58	69	60	69	63	63
	V_0 – по формуле (а) из таблицы А.1	21	81	13	53	45	70	57	93	19	59	51
	V_0 – по формуле (б) из таблицы А.1	29	102	15	64	55	87	67	112	32	77	64
Доу Го-жень (1960)		21	20	31	36	43	26	22	23	48	36	31⁴
Г.В. Железняков-В.К. Дебольский (1971)	w и V_0 – по Романовскому и Гончарову	28	49	49	39	32	36	47	41	74	65	46
	w – по Романовскому, V_0 – по Дебольскому	28	48	49	39	27	34	45	39	73	64	45
	w – по Дебольскому и V_0 – по Гончарову	20	41	42	32	27	25	35	33	70	60	39

³ Данные по р. Паране не использовались при выводе зависимости (3.1).

⁴ Выделены значения ошибок, не превышающие 50%.

Автор	Оценка точности расчета, %											Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ h_{\text{гр.расч}} - h_{\text{гр.изм}} }{h_{\text{гр.изм}}} 100\%$											
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	Парана (1983) ³	Парана (1992)		
<i>w</i> и V_0 – по Дебольскому	20	40	42	32	23	24	33	31	69	59	37	
М. Жилль (1971)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Н.С. Знаменская-1 (1968)	V_0 – по Гончарову	31	29	45	37	17	24	33	27	–	–	30
	V_0 – по по графику Знаменской $V_0 = f(H, d)$	35	33	59	–	27	22	27	25	–	–	33
Н.С. Знаменская-2 (1976)	–	20	–	72	75	121	–	–	200	107	99	
В.С. Кнороз (1960)	V_0 – по Гончарову	44	43	13	113	121	86	41	69	5	26	56
	V_0 – по Кнорозу	150	162	99	161	174	183	143	188	52	103	141
З.Д. Копалиани (1989)	49	66	47	15	169	29	21	74	17	45	53	
А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006)	22	22	10	26	35	34	24	43	31	25	27	
Ю.М. Корчоха (1968)	109	17	98	40	142	34	40	32	61	45	62	
А.Ф. Кудряшов (1958)	72	89	83	91	64	85	85	86	96	95	85	
Д.В. Носелидзе (1992)	20	19	13	72	60	44	21	39	22	18	33	
В.Ф. Пушкарев (1948)	742	1305	612	2943	1199	1783	1234	1421	1339	1494	1407	
Б.Ф. Сنيщенко (1980)	42	14	10	18	24	35	27	34	42	29	28	

Автор	Оценка точности расчета, %										Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ h_{\text{расч}} - h_{\text{изм}} }{h_{\text{изм}}} 100\%$										
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	Парана (1983) ³	Парана (1992)	
Б.Ф. Сниценко, З.Д. Копалиани (1989)	95	153	105	95	382	93	54	164	72	139	135
М.С. Ялин (1992)	17	14	28	14	16	20	20	22	47	33	23
Формула (3.1)	16	12	21	16	20	22	19	26	41	29	22

Таблица 3.2 – Сравнение результатов расчета высоты гряд по различным формулам с данными фактических измерений в реках второй категории

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ h_{\text{расч}} - h_{\text{изм}} }{h_{\text{изм}}} 100\%$								
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун		
М.Л. Амслер, М.И. Шредер (1998)	102	–	211	–	–	–	–	–	
А.Ш. Барекян (1962)	V_0 – по Гончарову	88	89	66	91	83	88	90	85
	V_0 – по формуле (а) из таблицы А.1	85	68	43	89	81	87	86	77
	V_0 – по формуле (b) из таблицы А.1	84	65	35	87	76	84	84	74
Доу Го-жень (1960)	16	52	60	32	95	35	23	45	
Г.В. Железняков, В.К.	w и V_0 – по Романовскому и Гончарову	27	74	16	37	152	65	22	56

Автор		Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
		$\Delta = \frac{ h_{\text{гр.расч}} - h_{\text{гр.изм}} }{h_{\text{гр.изм}}} 100\%$							
		Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
Дебольский (1971)	w – по Романовскому, V_0 – по Дебольскому	28	73	13	40	134	53	27	53
	w – по Дебольскому и V_0 – по Гончарову	26	69	18	37	150	65	21	55
	w и V_0 – по Дебольскому	27	68	15	40	131	53	25	51
М. Жилль (1971)		–	27	–	–	118	36	16	49
Н.С. Знаменская-1 (1968)	V_0 – по Гончарову	39	57	23	55	30	22	55	40
	V_0 – по по графику Знаменской $V_0 = f(H, d)$	61	51	24	67	30	42	70	49
Н.С. Знаменская-2 (1976)		120	18	44	–	60	72	61	63
В.С. Кнороз (1960)	V_0 – по Гончарову	15	34	109	26	101	37	19	49
	V_0 – по Кнорозу	36	25	131	–	–	–	22	–
З.Д. Копалиани (1989)		57	79	65	42	113	31	21	58
А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006)		44	63	20	56	30	24	49	41
Ю.М. Корчоха (1968)		53	82	272	20	45	42	23	77
А.Ф. Кудряшов (1958)		58	95	65	75	43	43	65	64
Д.В. Носелидзе (1992)		29	50	53	46	32	21	42	39

Автор	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ h_{\text{гр.расч}} - h_{\text{гр.изм}} }{h_{\text{гр.изм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
В.Ф. Пушкарев (1948)	148	526	787	44	95	34	50	241
Б.Ф. Снищенко (1980)	17	42	30	28	128	46	20	45
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани (1989)	75	71	163	40	152	46	20	81
М.С. Ялин (1992)	57	71	17	65	25	41	61	48

В тех случаях, когда авторы для расчетов рекомендуют собственные формулы для V_0 и w (см. таблицу А.1), расчет производился также и по ним (см. результаты расчета по формуле Железнякова-Дебольского – таблицы 3.1 и 3.2).

Ввиду отсутствия данных по уклону свободной поверхности по большинству рек, коэффициент сопротивления Шези для формул А.Ш. Барекяна и В.С. Кнороза рассчитывался по формуле Г.Л. Гладкова [107]:

$$C = 18,6\sqrt{g} \left(\frac{V}{\sqrt{gH}} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\sqrt[3]{\frac{gH^3}{v^2}} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (3.6)$$

Из таблиц 3.1 и 3.2 следует, что для равнинных рек первой категории наилучшие совпадения расчетных и измеренных величин высоты гряд получаются по формулам Ялина (средняя ошибка 23%), Снисченко (28%), Костюченко-Копалиани (27%) и по формуле (3.1), аппроксимирующей данные измерений (22%). Также приемлемые величины ошибок получаются по формулам Доу Го-женя (31%) и Носелидзе (33%).

Неприемлемые для практических расчетов результаты дают формулы Пушкарева, Кнороза при расчете V_0 по Кнорозу, Амслера и Шредера (для Дона, Днепра, Вычегды и Волги она дала отрицательные значения высоты гряд, поэтому значение ошибки не приводится) и вторая формула Знаменской, для которых средняя ошибка составила соответственно 1407, 141 и 99%.

Для равнинных рек второй категории наилучшее совпадение расчетных и измеренных величин дают формулы Носелидзе (39%), Костюченко-Копалиани (41%), Снисченко (45%) и Доу Го-женя (45%).

Неприемлемые для практического использования результаты получены по формулам Пушкарева (241%), Амслера и Шредера (отрицательные значения получились для рр. Лосихи, Поломети и Хии), Снисченко-Копалиани (81%), Кнороза при расчете V_0 по Кнорозу (неразмывающая скорость по формуле Кнороза вышла для некоторых рек меньше наблюдавшейся) и Корчохи (77%).

Для практических расчетов высоты гряд в условиях крупных равнинных рек, сложенных из песка крупностью 0,3-2,9 мм, в диапазоне значений глубины потока 2,9-13,7 м, скорости 0,72-2,1 м/с и чисел Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} = 0,09 \dots 0,19$ (см. таблицу 2.1) могут быть рекомендованы зависимость (3.1) и формулы А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани, Б.Ф. Снисченко и С. Ялина (таблица А.1).

Ввиду того, что масштабы r . Параны сильно превышают таковые для остальных рассматриваемых рек первой категории, рекомендации для нее следует дать отдельно. Для

данной реки, кроме формулы М.Л. Амслера и М.И. Шредера, аппроксимирующей данные измерений, можно рекомендовать формулы А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани, В.С. Кнороза (V_0 по Гончарову), З.Д. Копалиани и Д.В. Носелидзе.

Для расчетов высоты гряд в равнинных реках второй категории с крупностью донных отложений 0,26-7,5 мм в диапазоне изменения глубин потока 0,2-5,4 м, скоростей течения 0,45-1,76 м/с и чисел Фруда 0,13-0,50 (см. таблицу 2.2) могут быть рекомендованы зависимости А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани, Д.В. Носелидзе, Б.Ф. Снищенко и Доу Го-женья (таблица А.1).

3.2 Расчеты скорости перемещения песчаных гряд

Для анализа использовались 32 формулы, которые были разделены на две группы: расчетные (17 формул) (таблица А.2) и сугубо теоретические (таблица А.3), практическое использование которых невозможно ввиду неопределенности части входящих в них величин.

Расчет значений скорости перемещения гряд осуществлялся следующим образом.

В том случае, если анализируемая формула для скорости перемещения гряд содержит в качестве аргумента высоту гряды h_r , расчет по ней производился дважды: в первом случае использовалось измеренное значение h_r , во втором – рассчитанное по зависимости данного автора (формулы Гончарова-Лапшина, Железнякова-Дебольского, Знаменской, Корчохы, Копалиани и Снищенко-Копалиани-Твалавадзе).

При этом для формул Копалиани и Снищенко-Копалиани-Твалавадзе h_r определялась поочередно по каждой из зависимостей (см. таблицу А.1):

- З.Д. Копалиани $h_r = 0,39d \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2,5} Fr^{-3,75}$;
- А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани $h_r = 0,13H$;
- формуле (3.1) $h_r = 0,11H$;
- Б.Ф. Снищенко $h_r = 0,25H$ при $H \leq 1$ м и $h_r = 0,2 + 0,1H$ при $H > 1$ м;
- Б.Ф. Снищенко и З.Д. Копалиани $h_r = 2,1 \frac{d}{Fr^{4,1}} \left(\frac{V-V_0}{V_0}\right)^{1,4}$.

Величина неразмывающей скорости V_0 в формулах Гончарова-Лапшина, Копалиани, Снищенко-Копалиани-Твалавадзе определялась по формуле Гончарова (3.2). Доу Го-жень, Дебольский, Знаменская и Кнороз рекомендуют свои зависимости для определения V_0 , поэтому в расчетах по их формулам использовались зависимости этих авторов (формула Кнороза была применена только к рекам первой категории, т.к. значение V_0 для рек второй категории в ряде случаев получается больше наблюдаемой скорости течения).

Для определения гидравлической крупности w в формуле Железнякова-Дебольского использовалась формула Дебольского [17]. Для формул Знаменской и Корчохи она была определена по зависимостям В.В. Романовского (3.3)-(3.5).

Величина коэффициента Шези для вычисления гидравлического коэффициента трения λ , используемого в формуле Кнороза, ввиду отсутствия для большинства рек данных по уклону водной поверхности определялась по формуле Г.Л. Гладкова (3.6).

В таблицах 3.3 и 3.4 приведены результаты расчетов по 17 формулам, при этом в таблице 3.3 отсутствует расчет по формуле Цубаки-Кавасуми-Ясутоми, т.к. почти для всех крупных рек нет данных по уклону, а в таблице 3.4 нет результатов расчетов по формуле Кнороза (см. выше). Из этих таблиц следует, что величина погрешности при расчете скорости гряд достаточно невелика: наименьшее значение ошибки составило 39%.

Таблица 3.3 – Результаты расчета скорости гряд для равнинных рек первой категории

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{Г\text{расч}} - C_{Г\text{изм}} }{C_{Г\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
А.Ш. Барекян (1962)	278	164	288	455	103	667	727	342	378
Н.Х. Брукс-1 (1955)	162	789	569	5286	1532	1282	721	1098	1430
Н.Х. Брукс-2 (1955)	328	1353	994	8706	2568	2160	1242	1858	2401
М.А. Великанов, Е.М. Минский (1955)	82	61	65	31	72	43	49	45	56⁵
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) h_r измерена	191	174	152	1536	312	1089	565	377	549
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) h_r рассчитана	1027	964	1242	2371	697	2719	2692	1606	1665
Доу Го-жень (1960)	53	79	53	40	49	30	38	63	50
Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) h_r измерена	2695	2810	1910	3605	1382	6562	6537	5627	3891
Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) h_r рассчитана	3571	7753	5906	7288	2186	10646	13523	11354	7778
Н.С. Знаменская (1968) h_r, l_r – измерены	– ⁶	1722	–	783	349	1232	–	–	1022
Н.С. Знаменская (1968) $\frac{h_r}{l_r}$ – по Знаменской	– (**) ⁷	– (**)	– (**)	775	440	1889 (*) ⁸	–	–	–

⁵ Выделены значения ошибок, не превышающие 60%.

⁶ Здесь и далее в этой строке нет данных по длине гряды (то же в таблице 3.4).

⁷ Двумя звездами отмечены пропуски, образовавшиеся в силу того, что весь ряд имеющихся значений гидрологических характеристик на данной реке выходит за рамки применимости номограмм Н.С. Знаменской.

⁸ Одной звездой помечены значения, полученные лишь по части ряда по причине, указанной в сноске 7 (то же в таблице 3.4).

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{Г\text{расч}} - C_{Г\text{изм}} }{C_{Г\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
Н.С. Знаменская (1963) V_0 – по Знаменской h_r – измерена	60	43 (*)	70	– (**)	90 (*)	36	64 (*)	47 (*)	–
Н.С. Знаменская (1963) V_0 – по Знаменской $\frac{h_r}{H}$ – по Знаменской	40	14 (*)	34	– (**)	87 (*)	36	87 (*)	41 (*)	–
В.С. Кнороз (1960) V_0 – по Кнорозу	29	33	24	49	53	94	117	40	55
Ю.М. Корчоха (1968) h_r измерена	76	$C_r < 0$	35	71	30	111	$C_r < 0$	$C_r < 0$	–
Ю.М. Корчоха (1968) h_r рассчитана	$C_r < 0$	$C_r < 0$	$C_r < 0$	106	41	$C_r < 0$	257	$C_r < 0$	–
О.М. Кондеп, Р.Ж. Гарде (1973)	37	63	37	36	58	67	59	41	50
З.Д. Копалиани (1989) h_r измерена	38	52	28	42	27	58	58	36	42
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Копалиани (1989)	39	66	42	32	62	56	50	44	49
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Костюченко-Копалиани (2006)	35	58	24	46	40	38	44	34	40
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле (3.1)	33	52	22	50	35	50	56	30	41
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Снищенко (1980)	41	55	25	48	36	37	41	32	39

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{\text{расч}} - C_{\text{изм}} }{C_{\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Снищенко-Копалини (1989)	48	77	57	31	76	27	33	58	51
А.Ф. Кудряшов (1958)	170	96	164	481	72	579	542	215	290
В.Ф. Пушкарев (1948)	173	113	$C_r < 0$	514	90	645	608	199	–
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани (1978)	35	58	30	44	54	78	72	37	51
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r измерена	61	25	38	130	38	171	136	61	82
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Копалиани (1989)	40	38	32	116	45	160	125	41	75
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Костюченко- Копалиани (2006)	42	26	44	111	31	130	114	47	68
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле (3.1)	47	27	55	138	40	158	138	54	82
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Снищенко (1980)	41	25	46	129	37	126	106	51	70

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{гр\text{расч}} - C_{гр\text{изм}} }{C_{гр\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Смищенко-Копалини (1989)	34	56	28	50	53	85	79	35	53

Таблица 3.4 – Результаты расчета скорости гряд для равнинных рек второй категории

Автор	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{гр\text{расч}} - C_{гр\text{изм}} }{C_{гр\text{изм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогоул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
А.Ш. Барекян (1962)	272	283	288	187	43	47	47	167
Н.Х. Брукс-1 (1955)	214	240	868	82	90	94	79	238
Н.Х. Брукс-2 (1955)	414	420	1482	137	84	90	65	384
М.А. Великанов, Е.М. Минский (1955)	91	91	81	96	99	99	99	94
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) h_r измерена	173	231	716	50	42	35	46	185
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) h_r рассчитана	742	990	1096	467	94	79	162	519
Доу Го-жень (1960)	189	58	75	123	45	69	25	84
Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) h_r измерена	116	83	1197	32	240	33	34	248

Автор	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{\text{гр расч}} - C_{\text{гр изм}} }{C_{\text{гр изм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) h_r рассчитана	286	1016	958	138	32	45	25	357
Н.С. Знаменская (1968) h_r, l_r – измерены	–	240	536	–	35	34	203	210
Н.С. Знаменская (1968) $\frac{h_r}{l_r}$ – по Знаменской	333	251 (*)	597	499	52	24	374	–
Н.С. Знаменская (1963) V_0 – по Знаменской h_r – измерена	95	93	81	97	98	99	99	95
Н.С. Знаменская (1963) V_0 – по Знаменской $\frac{h_r}{H}$ – по Знаменской	89	88 (*)	76	91	97	98	95	–
Ю.М. Корчоха (1968) h_r измерена	81	$C_r < 0$	101	18	27	12	37	–
Ю.М. Корчоха (1968) h_r рассчитана	173	$C_r < 0$	48	27	$h_r = 0$	44	41	–
О.М. Кондеп, Р.Ж. Гарде (1973)	58	93	57	40	35	27	40	50
З.Д. Копалиани (1989) h_r измерена	54	67	76	24	28	19	56	46
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Копалиани (1989)	48	84	51	34	39	29	45	47
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Костюченко-Копалиани (2006)	111	54	64	61	19	25	31	52

Автор	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ C_{\text{гр расч}} - C_{\text{гр изм}} }{C_{\text{гр изм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле (3.1)	141	52	77	83	24	29	29	62
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Снищенко (1980)	60	58	58	27	43	38	54	48
З.Д. Копалиани (1989) h_r рассчитана по формуле Снищенко-Копалини (1989)	37	71	40	31	47	35	57	45
А.Ф. Кудряшов (1958)	251	418	274	158	28	31	29	170
В.Ф. Пушкарев (1948)	258	350	296	183	36	46	38	173
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани (1978)	61	94	59	40	34	27	38	50
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r измерена	103	53	157	33	36	14	35	61
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Копалиани (1989)	114	132	95	72	31	29	28	71
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Костюченко-Копалиани (2006)	195	63	136	123	31	32	23	86
Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле (3.1)	232	72	166	150	37	43	31	105

Автор	Оценка точности расчета, % $\Delta = \frac{ C_{г\text{расч}} - C_{г\text{изм}} }{C_{г\text{изм}}} 100\%$							Средняя оценка, %
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Сنيщенко (1980)	117	51	116	51	28	21	33	60
Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) h_r рассчитана по формуле Снищенко-Копалини (1989)	67	99	63	43	33	26	36	53
Т. Цубаки, Т. Кавасуми, Т. Ясутоми (1953)	– ⁹	73	–	–	35	30	29	42

⁹ Здесь и далее в этой строке нет данных по уклону.

Для рек первой категории приемлемые для практического использования результаты получены по формулам Великанова-Минского (со средней ошибкой 56%), Доу Го-женя (50%), Кнороза (55%), Кондепа-Гарде (50%), Копалиани (42% – h_r измерена, 49% – h_r рассчитана по формуле Копалиани, 40% – h_r рассчитана по формуле Костюченко-Копалиани, 41% – h_r по формуле (3.1), 39% – h_r по Смищенко, 51% – h_r по Смищенко-Копалиани), Смищенко-Копалиани (51%) и Смищенко-Копалиани-Твалавадзе при значении h_r , рассчитанном по формуле Смищенко-Копалиани (53%).

Формулы Брукса, Гончарова-Лапшина (при рассчитанном значении h_r), Железнякова-Дебольского не могут быть использованы для расчета, т.к. ошибка при их проверке составила более 1000%. Формулы Знаменской также рекомендовать нельзя, т.к. они, с одной стороны дают большие ошибки, с другой – не охватывают всего диапазона использованных данных измерений. Расчеты по формулам Корчохи и Пушкарева (последний – для одного измерения на Днепре) дали значения $C_T < 0$, что не имеет физического смысла.

Для рек второй категории хорошие результаты получены по формулам Кондепа-Гарде (50%), Копалиани (46% – h_r измерена, 47% – h_r по Копалиани, 52% – h_r по Костюченко-Копалиани, 48% – h_r по Смищенко, 45% – h_r по Смищенко-Копалиани), Смищенко-Копалиани (50%), Смищенко-Копалиани-Твалавадзе (53% – h_r по Смищенко-Копалиани) и Цубаки-Кавасуми-Ясутоми (42%).

Наиболее неудовлетворительные результаты по рекам второй категории дали зависимости Гончарова-Лапшина при рассчитанном значении h_r (ошибка при расчете по ней превысила 500%), Знаменской и Корчохи ($C_T < 0$).

Таким образом, для крупных равнинных рек можно рекомендовать рассчитывать скорость перемещения песчаных гряд по формулам З.Д. Копалиани, О.М. Кондепа и Р.Ж. Гарде, Доу Го-женя, Б.Ф. Смищенко и З.Д. Копалиани, Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани и О.А. Твалавадзе (при расчете h_r – по Смищенко-Копалиани), В.С. Кнороза и М.А. Великанова и Е.М. Минского (таблица А.2). Для равнинных рек второй категории – по зависимостям Т. Цубаки, Т. Кавасуми и Т. Ясутоми, З.Д. Копалиани, О.М. Кондепа и Р.Ж. Гарде, Б.Ф. Смищенко и З.Д. Копалиани и Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани и О.А. Твалавадзе (при расчете h_r – по Смищенко-Копалиани).

3.3 Расчеты расхода донных наносов в равнинных реках по формулам, учитывающим в явном виде грядовую структуру

В настоящем разделе использованы формулы из разделов 3.1 и 3.2. Расчет расхода донных наносов проводился для двух случаев: когда *высота гряд измерена* (в полевых условиях измерение высоты гряд требует значительно меньше времени и усилий, чем измерение их скорости) и когда *данные о высоте гряд отсутствуют*. При рассмотрении первого случая для проверки были взяты формулы из пункта 3.2, давшие наилучшие результаты. При рассмотрении второго – формулы тех авторов, которые предлагают зависимости как для высоты, так и для скорости гряд, при этом формулы некоторых авторов из ГГИ комбинировались между собой.

В таблицах 3.5 и 3.6 приведены фамилии авторов формул по таблице А.2 и результаты расчетов по ним для случая *наличия данных о высоте гряд* соответственно для равнинных рек первой и второй категорий.

В таблицах 3.7 и 3.8 – то же для ситуации отсутствия данных измерений высоты гряд, т.е. и скорость гряд, и их высота определялись по рекомендациям авторов проверяемых формул (см. таблицы А.1 и А.2).

Как следует из таблиц 3.5 и 3.6, все формулы, приведенные в этих таблицах, дают приемлемые результаты для использования их в целях расчета расхода донных наносов в пределах изменения средней ошибки 42-56% – для крупных рек и 42-50% – для рек второй категории.

Таблица 3.5 – Расход донных наносов равнинных рек первой категории, вычисленный при условии *наличия данных по высоте гряд*

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
1. М.А. Великанов, Е.М. Минский (1955)	82	61	65	31	72	43	49	45	56¹⁰
2. Доу Го-жень (1960)	53	79	53	40	49	30	38	63	50
3. В.С. Кнороз (1960)	29	33	24	49	53	94	117	40	55
4. О.М. Кондеп, Р.Ж. Гарде (1973)	37	63	37	36	58	67	59	41	50
5. З.Д. Копалиани (1989)	38	52	28	42	27	58	58	36	42
6. Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	35	58	30	44	54	78	72	37	51

Таблица 3.6 – Расход донных наносов равнинных рек второй категории, вычисленный при условии *наличия данных по высоте гряд*

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
1. О.М. Кондеп, Р.Ж. Гарде (1973)	58	93	57	40	35	27	40	50
2. З.Д. Копалиани (1989)	54	67	76	24	28	19	56	46
3. Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	61	94	59	40	34	27	38	50

¹⁰ Выделены значения ошибок, меньше 60%.

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
4. Т. Цубаки, Т. Кавасуми, Т. Ясутоми (1953)	–	73	–	–	35	30	29	42

Таблица 3.7 – Расход донных наносов равнинных рек первой категории, вычисленный в условиях *отсутствия данных по характеристикам гряд*

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
1. А.Ш. Барекян (1962)	344	367	278	676	142	1151	1205	726	611
2. А.Ш. Барекян (1962)	400	421	325	755	163	1288	1467	821	705
3. Доу Го-жень (1960)	57	83	67	33	37	38	47	66	53
4. Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971)	3057	4642	3366	5069	1674	8152	9187	7806	5369
5. В.С. Кнороз (1960)	176	84	120	238	48	435	420	224	218
6. З.Д. Копалиани (1989)	41	47	26	45	26	60	61	37	43
7. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), З.Д. Копалиани (1989)	40	50	29	42	25	65	63	37	44
8. Формула (3.1), З.Д. Копалиани (1989)	40	52	30	41	27	61	60	37	43
9. Б.Ф. Смищенко (1980), З.Д. Копалиани	40	51	28	41	27	65	64	37	44

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}} }{q_{\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
(1989)									
10. Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1989), З.Д. Копалиани (1989)	44	42	24	53	26	74	69	40	47
11. А.Ф. Кудряшов (1958)	36	79	56	47	58	27	44	57	51
12. З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1978)	47	34	21	57	28	86	85	44	50
13. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1978)	43	50	34	56	43	118	98	41	60
14. Формула (3.1), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1978)	39	58	45	39	52	91	75	40	55
15. Б.Ф. Смищенко (1980), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1978)	48	55	35	44	49	124	109	40	63
16. Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1989), (1978)	81	39	52	168	89	211	158	97	112
17. З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	73	31	43	138	68	180	143	83	95
18. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	70	28	36	141	41	193	148	74	91
19. Формула (3.1), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	67	25	34	129	37	179	137	69	85
20. Б.Ф. Смищенко (1980), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	73	26	36	132	39	195	152	70	90
21. Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани, О.А.	85	44	58	185	100	228	169	107	122

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}} }{q_{\text{Тизм}}} 100\%$							
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Выгегда	Волга (1966)	Волга (1974)
Твалавадзе (1977)								

Таблица 3.8 – Расход донных наносов равнинных рек второй категории, вычисленный в условиях *отсутствия данных по характеристикам гряд*

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}} }{q_{\text{Тизм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
1. А.Ш. Барекян (1962)	44	69	133	68	74	82	81	79
2. А.Ш. Барекян (1962)	45	75	158	62	67	77	78	80
3. Доу Го-жень (1960)	189	68	171	78	183	124	26	120
4. Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971)	176	268	1062	45	44	16	14	232
5. З.Д. Копалиани (1989)	60	76	88	28	40	17	58	53
6. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), З.Д. Копалиани (1989)	43	73	81	32	33	24	62	50
7. Формула (3.1), З.Д. Копалиани (1989)	40	74	77	34	32	26	63	49
8. Б.Ф. Сنيщенко (1980), З.Д. Копалиани (1989)	53	70	84	27	43	13	56	49
9. Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1989),	68	75	102	26	43	13	56	55

Автор и номер формулы	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
З.Д. Копалиани (1989)								
10. А.Ф. Кудряшов (1958)	45	83	34	44	36	30	60	47
11. В.Ф. Пушкарев (1948)	926	3363	4075	308	127	81	81	1280
12. З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	74	73	110	25	48	9	53	56
13. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	33	58	77	47	36	41	70	52
14. Формула (3.1), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	36	61	64	55	39	50	74	54
15. Б.Ф. Сنيщенко (1980), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1978)	50	61	85	25	61	21	40	49
16. Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1989), (1978)	126	61	223	32	70	13	36	80
17. З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	115	64	196	29	65	10	40	74
18. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	80	55	168	24	45	8	47	61
19. Формула (3.1), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	74	57	155	24	41	11	50	59
20. Б.Ф. Сنيщенко (1980), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977)	100	54	179	29	70	17	35	69
21. Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани (1989), Б.Ф. Сنيщенко, З.Д. Копалиани, О.А.	133	59	239	35	73	15	34	84

Как следует из таблиц 3.7-3.8, в случае *отсутствия данных по высоте гряд* наилучшие результаты для *равнинных рек первой категории* получены по следующим формулам:

- Доу Го-женя (53%);
- по сочетаниям формулы для скорости гряд Копалиани с формулами для высоты гряд
 - Копалиани (43%);
 - Костюченко-Копалиани (44%);
 - формулой (3.1) (43%);
 - Снищенко (44%);
 - Снищенко-Копалиани (47%);
- Кудряшова (51%);
- по сочетаниям формулы для скорости гряд Снищенко-Копалиани с формулами для высоты гряд
 - Копалиани (50%);
 - формулой (3.1) (55%).

Наилучшие результаты для *равнинных рек второй категории* дали следующие формулы:

- сочетания формулы для скорости гряд Копалиани с формулами для высоты гряд
 - Копалиани (53%);
 - Костюченко-Копалиани (50%);
 - формулой (3.1) (49%);
 - Снищенко (49%);
 - Снищенко-Копалиани (55%);
- Кудряшова (47%);
- сочетания формулы для скорости гряд Снищенко-Копалиани с формулами для высоты гряд
 - Копалиани (56%);
 - Костюченко-Копалиани (52%);
 - формулой (3.1) (54%);
 - Снищенко (49%);
- сочетание формулы для скорости гряд Снищенко-Копалиани-Твалавадзе с формулой для высоты гряд (3.1) (59%).

Средняя ошибка расчетов расхода донных наносов по формуле А.Ф. Кудряшова для рек первой категории составила 51%, в то время как ошибки расчетов по его

формулам дали соответственно для высоты гряд 85%, для скорости гряд 290%. Для рек второй категории средняя ошибка расчетов расхода донных наносов составила 47%, тогда как ошибка расчета высоты гряд – 64%, а ошибка расчета скорости гряд – 170%. Это свидетельствует об отсутствии физической составляющей в этих формулах, поэтому формулу Кудряшова, несмотря на хороший результат, рекомендовать для расчетов нельзя.

В результате выполненного анализа и расчетов можно сделать следующее заключение.

1. Расход донных наносов при их грядовом движении в крупных равнинных реках *при условии наличия данных по высоте гряд* можно рекомендовать рассчитывать по формулам (1-6) по таблице 3.5;
2. Расход донных наносов для равнинных рек второй категории *при наличии данных по высоте гряд* можно рассчитывать по формулам (1-4) (таблица 3.6);
3. Расход донных наносов в крупных равнинных реках *при отсутствии данных по характеристикам гряд* следует рассчитывать по формулам (3), (6-10), (12) и (14) (таблица 3.7);
4. Расход донных наносов в равнинных реках второй категории *при отсутствии данных* следует рассчитывать по формулам (5-9), (12-15) и (19) (таблица 3.8).

Средняя погрешность расчетов по всем формулам, перечисленным в пунктах 1-4, составляет не более 60%.

3.4 Расчеты расхода донных наносов в равнинных реках по формулам, не учитывающим в явном виде характеристики гряд

Всего было проверено 80 формул отечественных (29) и зарубежных (51) исследователей (см. таблицу А.4). Проанализированные формулы по структуре можно разбить на несколько групп:

1. Формулы, содержащие критерий начала движения, в качестве которого используются:
 - критическая скорость потока $q_T = f(V_0)$ – 16 формул,
 - критический расход воды $q_T = f(q_0)$ – 6 формул,
 - критическое безразмерное касательное напряжение на дне потока $q_T = f(\theta_0)$ – 33 формулы,
 - критический энергетический уклон $q_T = f(I_0)$ – 1 формула.
2. Вероятностный подход $q_T = f(P)$ – 4 формулы.

3. Подход, основанный на принципе равной подвижности наносов – 1 формула (Г. Паркер).
4. Регрессионные зависимости $q_T = f(x, y, \dots)$ – 19 формул.

Формулы, содержащие энергетический уклон или его производные, не проверялись для массивов данных Дона, Иртыша, Камы, Белой, Вычегды, второго массива Волги, Ануя и Тогула ввиду отсутствия данных по этой характеристике. Формулы, использующие безразмерный критерий Шильдса и безразмерную функцию Эйнштейна, проверялись в нескольких вариантах. В качестве критического значения безразмерного касательного напряжения θ_0 выбирались следующие: по автору (если он предлагал собственное значение) или 0,06 – по Шильдсу и 0,03 – по Копалиани [37]. Во всех формулах в качестве характеристики гранулометрического состава использовался средневзвешенный диаметр d . Формулы, использующие поправочные коэффициенты на неоднородность грунта, проверялись только без учета таких коэффициентов, ввиду отсутствия подробных данных по гранулометрическому составу и так как донные отложения равнинных рек, несмотря на неоднородность, приходят в движение при близких скоростях потока.

Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении этих формул использовалось следующее выражение: $\Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$, т.е. занижение или завышение результата расчетов в 2 раза и менее. Соответствие проверяемых формул конкретной группе экспериментальных данных оценивалось по значению Δ , осредненному по данной группе (объекту).

Ниже приведены результаты расчетов по формулам, показавшим наилучшие результаты ($0,5 \leq \Delta \leq 2,0$) соответственно для крупных рек (таблицы 3.9-3.11) и рек второй категории (таблицы 3.12-3.14).

Таблица 3.9 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 6 группах данных из 8 (реки первой категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}}$							
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)
Л.Д. Коган и В.П. Углов (1985)	0,76	0,60	0,59	1,11	1,11	2,98	3,71	1,14

Таблица 3.10 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 5 группах данных из 8 (реки первой категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$							
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)
А.Н. Бутаков (1998)	0,94	0,63	0,77	1,67	0,37	2,71	2,52	1,19

Таблица 3.11 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 4 группах данных из 8 (реки первой категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$							
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)
Л.Г. Гвелесиани (1946)	1,96	1,42	1,73	4,91	1,23	5,93	4,79	2,64
В.Н. Гончаров (1962)	1,68	1,17	1,15	3,79	0,69	4,82	3,93	2,18
К.В. Гришанин (1969)	0,46	0,20	0,37	1,44	0,72	1,09	0,61	0,39
В.Н. Лазарев и Ф.М. Чернышов (1974)	1,13	0,42	0,59	1,43	0,33	3,06	2,81	0,88
И.И. Леви (1957) (V_0-1)	1,53	1,50	1,49	7,76	1,89	6,98	5,12	2,73
И.И. Леви (1957) (V_0-2)	1,53	1,50	1,49	7,76	1,89	6,98	5,12	2,73
Н.В. Рухадзе (1985)	0,45	0,50	0,42	2,73	0,59	1,64	1,00	0,87
Г.И. Шамов (1952)	0,53	0,21	0,33	0,72	0,18	1,26	1,08	0,42

Таблица 3.12 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 6 группах данных из 7 (реки второй категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$						
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун
А.Н. Бутаков (1998)	1,22	1,65	2,83	0,84	1,41	1,02	0,56

Таблица 3.13 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 5 группах данных из 7 (реки второй категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$

	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун
В.Н. Лазарев и Ф.М. Чернышов (1974)	0,70	1,46	1,17	0,45	0,59	0,57	0,26
Б.В. Поляков	1,90	1,43	5,17	0,92	0,79	0,52	0,41

Таблица 3.14 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 4 группах данных из 7 (реки второй категории)

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$						
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун
М.А. Великанов	6,52	1,02	11,49	2,70	1,51	0,98	0,74
К.В. Гришанин (1969)	1,88	0,47	2,61	1,08	1,39	1,10	0,45
А.Ф. Кудряшов	0,65	0,45	0,92	0,41	0,68	0,57	0,21
И.И. Леви (1957) (V_0-1)	1,50	2,00	4,46	0,75	0,65	0,48	0,32
И.И. Леви (1957) (V_0-2)	1,50	2,00	4,46	0,84	0,65	0,48	0,32
Дж. Роттнер (1959)	2,15	2,67	6,82	1,18	0,87	0,62	0,63
Х.А. Эйнштейн (1950) (по К.В. Гришанину)	–	0,38	–	0,55	1,38	0,96	0,80

Исходя из предположения К.В. Гришанина о допустимой погрешности расчетов расхода донных наносов на современном этапе развития вопроса, высказанном им в 1990 г.: «Большим успехом будет возможность рассчитывать расходы наносов в реках, ошибаясь менее чем в 1,5 раза», – все эти формулы могут быть рекомендованы для практических расчетов. Однако, если результаты по этим формулам представить через относительную погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$, очевидно, что в целом они менее эффективны, чем полученные с учетом характеристик гряд (пункт 3.3). В таблицах 3.15.-3.16 приводятся значения данной погрешности для указанных формул.

Таблица 3.15 – Результаты расчетов по отобранным формулам в пересчете на погрешность

$$\Delta = \frac{|q_{\text{трасч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\% \text{ (реки первой категории)}$$

Автор	Оценка точности расчета, %								Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{изм}} }{q_{\text{изм}}} 100\%$								
	Дон	Иртыш	Днепр	Кама	Белая	Вычегда	Волга (1966)	Волга (1974)	
Л.Д. Коган и В.П. Углов (1985)	33¹¹	40	50	48	95	198	273	51	99
А.Н. Бутаков (1998)	41	37	44	67	63	171	156	50	79
Л.Г. Гвелесиани (1946)	105	64	77	391	60	493	379	168	217
В.Н. Гончаров (1962)	81	45	34	279	49	382	293	123	161
К.В. Гришанин (1969)	61	80	63	49	28	51	45	61	55
В.Н. Лазарев и Ф.М. Чернышов (1974)	52	58	46	47	67	210	184	45	89
И.И. Леви (1957) (V_0-1)	96	78	72	676	96	598	412	179	276
И.И. Леви (1957) (V_0-2)	96	78	72	676	96	598	412	179	276
Н.В. Рухадзе (1985)	61	50	58	173	44	86	43	46	70
Г.И. Шамо́в (1952)	47	79	67	36	82	53	47	58	59

¹¹ Выделены значения ошибок не более 60%.

Таблица 3.16 – Результаты расчетов по отобранным формулам в пересчете на погрешность

$$\Delta = \frac{|q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}}|}{q_{\text{тизм}}} 100\% \text{ (реки второй категории)}$$

Автор	Оценка точности расчета, %							Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$							
	Ануй	Лосиха	Тогул	Полометь	Хии-Игайя	Хии-Курихара	Хии-Надабун	
А.Н. Бугаков (1998)	43	198	183	24	51	9	44	79
В.Н. Лазарев и Ф.М. Чернышов (1974)	38	97	71	56	49	43	74	61
Б.В. Поляков	90	98	417	32	33	48	59	111
М.А. Великанов	552	78	1049	182	58	18	26	280
К.В. Гришанин (1969)	96	67	168	44	57	30	55	74
А.Ф. Кудряшов	41	69	56	59	44	43	79	56
И.И. Леви (1957) (V ₀ -1)	99	152	346	41	44	52	68	115
И.И. Леви (1957) (V ₀ -2)	99	152	346	43	44	52	68	115
Дж. Роттнер (1959)	127	187	582	32	37	38	37	149
Х.А. Эйнштейн (1950) (по К.В. Гришанину)	–	62	–	50	42	16	23	–

Такое представление результатов расчета значительно сужает круг формул, пригодных для использования в инженерной практике. Как следует из таблицы 3.16, среднюю погрешность не более 60%, выбранную в качестве критерия для отбора формул, учитывающих гряды в явном виде, для крупных рек дали две формулы: К.В. Гришанина (1969) и Г.И. Шамова (1952). Для рек второй категории (таблица 3.16) аналогичный результат получен по формуле А.Ф. Кудряшова. Формула В.Н. Лазарева и Ф.М. Чернышова (1974) показывает устойчивую эффективность по всем данным, несмотря на то, что средний результат немного превосходит 60% (61%).

Таким образом, для практических расчетов расхода донных наносов в крупных равнинных реках при грядовом движении донных наносов, наряду с формулами, учитывающими в явном виде геометрические и динамические характеристики гряд, можно рекомендовать вести по формулам, не учитывающим в явном виде грядовую форму транспорта наносов (подробную запись формул см. в таблице А.4):

- К.В. Гришанина (1969) [13]

$$q_T = 0,015 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 d(V - V_0) \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}, V_0 = 0,96\sqrt{gd}^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \left(\frac{H}{d}\right)^{0,2} - \text{ по Гончарову (1938).}$$

- Г.И. Шамова (1952) [82]

$$q_T = 0,95\sqrt{d} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м} - \text{ для однородных грунтов, } V_0 = 3,83d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}}.$$

Расход донных наносов в равнинных реках второй категории следует рассчитывать по формулам:

- А.Ф. Кудряшова [1]

$$q_T = 0,078 \frac{V^4}{H^2} q \text{ кг}/\text{с}/\text{м}.$$

- В.Н. Лазарева и Ф.М. Чернышова (1974) [51]

$$q_T = 0,1 \left(\frac{d}{H}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{d}{w} \sqrt{\frac{V-V_0}{w}} (V - V_0)^2 \frac{q}{H\sqrt{gH}} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}, V_0 = 3,83d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}},$$

w – по В.В. Романовскому [31].

Остальные формулы из таблиц 3.9-3.14, показавшие совпадение расчетных и измеренных величин в пределах $0,5 \leq \Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}} \leq 2,0$, так же могут быть использованы в расчетах, однако в более узких пределах гидравлических характеристик.

Из других наиболее популярных формул результат $0,5 \leq \Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}} \leq 2,0$ для отдельных объектов показали формулы: М. Вонга и Г. Паркера (2006) (по рекам Лосиха,

Полометь, Хи), Г. Паркера (1982) (Полометь, Хи), Х.А. Эйнштейна (1942) (Полометь, Хи).

Следует отметить, что больше трети из 80 проверенных формул не показало совпадения расчетных величин с измеренными ни по одной из рек. Среди них зависимости Л. Ван Рейна (1984), Доу Го-женя (1960), Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера (1948), П.И. Жюльена, а также Я.С. Рибберинка (1998) (см. таблицу А.4).

Расчеты по методам, использующим критическое касательное напряжение, показали их неприменимость для равнинных рек, так как фактически наблюдаемые касательные напряжения превосходят критическое на 1-2 порядка.

В заключение следует сделать вывод о том, что формулы, основанные на учете характеристик донных гряд, для равнинных рек более эффективны, чем прочие методы расчета.

Глава 4. Расчеты расхода донных наносов в горно-предгорных реках при грядовой и безгрядовой формах движения руслового материала

4.1 Расчеты расхода донных наносов при грядовой форме их перемещения в горно-предгорных реках

4.1.1 Расчеты по формулам, учитывающим в явном виде грядовую структуру

На основе экспериментов, представленных в таблице 2.3, З.Д. Копалиани была подтверждена [38] полученная ранее [73] зависимость для скорости движения крупных донных наносов в грядовой форме в виде

$$C_r = 0,019VFr^3 \quad (4.1)$$

И с учетом зависимости для высоты гряд для крупных наносов в диапазоне $30 \leq \frac{H}{d} \leq 150$, полученной в ГГИ Д.В. Носелидзе [33]

$$h_r = \left(0,07 \frac{V}{V_0} + 0,02\right) H \quad (4.2)$$

где V_0 рассчитывается по формуле В.Ф. Талмазы для однородных наносов $V_0 = 2,4 \frac{m-1,5}{m+1} \left(\frac{H}{d}\right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\frac{\gamma_r - \gamma}{\gamma} gd}$, $m = 1,5 + 0,314 \frac{c}{\sqrt{g}}$ [76], им была установлена зависимость для расхода крупных донных наносов, перемещающихся в грядовой форме [38]:

$$q_r = q \left(0,0008 \frac{V}{V_0} + 0,0002\right) Fr^3 \quad (4.3)$$

В рамках настоящей работы автором была получена формула для расчета высоты гряд в реках горно-предгорной зоны, аппроксимирующая данные измерений таблицы В.3 (рисунок 4.1):

$$h_r = 0,22H \quad (4.4)$$

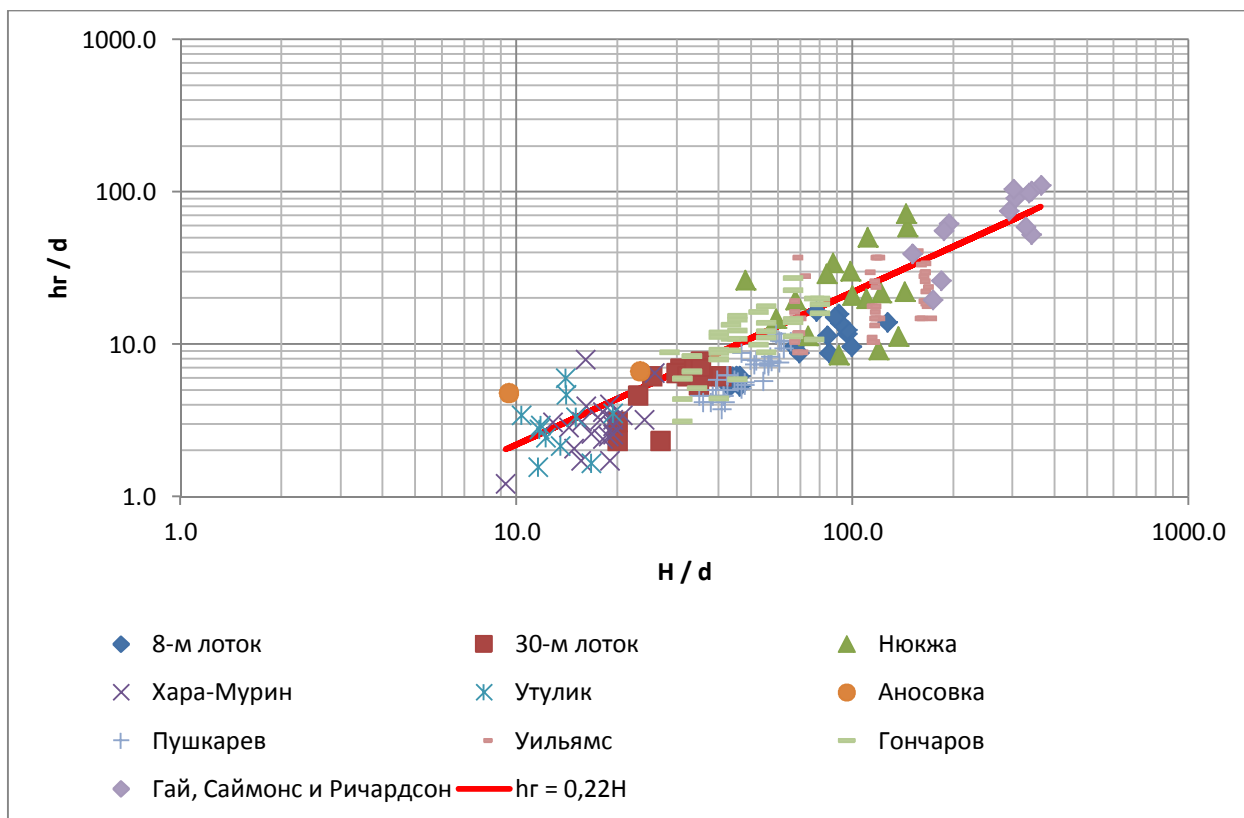


Рисунок 4.1 – Зависимость относительной высоты гряд $\frac{h_r}{d}$ от относительной гладкости потока $\frac{H}{d}$ в горно-предгорных реках по данным таблицы В.3

При выводе этой зависимости в отличие от зависимости (4.2), основанной на данных измерений в 8-метровом и 30-метровом гидравлических лотках и данных трех пространственных гидравлических моделей, были использованы все данные таблицы В.3. Совместное применение этой формулы с зависимостью (4.1) дает следующее выражение для расхода донных наносов:

$$q_T = 0,0025HVFr^3 \quad (4.5)$$

Для проверки в рамках данного раздела были выбраны также формулы других исследователей грядового перемещения крупных наносов: В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938), В.С. Кнороза (1960), Ю.М. Корчохи (1968) и В.Ф. Пушкарева (1948) (таблицы А.1 и А.2).

Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении этих формул использовалось выражение: $\Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$, т.е. занижение или завышение результата расчетов в 2 раза и менее. Соответствие проверяемых формул конкретной группе экспериментальных данных (объекту) оценивалось по значению Δ , осредненному по данной группе.

Результаты расчетов по формулам (4.3) и (4.5) приведены в таблице 4.1. Формула (4.3) проверена с использованием двух формул Талмазы для неразмывающей скорости: приведенной выше и формулы $V_0 = 2,8\sqrt{d_{max}H}$ [75].

В таблице 4.2 представлены результаты расчетов расхода донных наносов, выполненных по формулам, выбранным из таблиц А.1 и А.2. Настоящие расчеты выполнены с целью выяснения пригодности этих формул за рамками условий, для которых они были получены.

Таблица 4.1 – Результаты расчета расхода донных наносов по формулам (4.3) и (4.5)

Формула	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$										Средняя оценка
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
(4.3)	1,21	0,83	4/17 $V < V_0^{12}$	2/21 $V < V_0$	0,59	0,38	0,74	1,13	₁₃	0,40	–
(4.3)-2	1,57	0,98	0,58	1,06	0,82	0,52	0,93	1,27	0,85	0,51	0,91
(4.5)	1,85	1,36	0,92	1,47	1,18	0,80	1,40	2,27	0,93	0,70	1,29

Таблица 4.2 – Результаты расчета расхода донных наносов по формулам, полученным для грядового движения крупных наносов

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$										Средняя оценка
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
В.Н. Гончаров, Г.Н.	1,25	0,80	0,46	0,57	0,41	0,22	0,65	1,27	0,63	0,62	0,69

¹² В четырех из семнадцати измерений фактическая скорость потока была меньше неразмывающей.

¹³ Нет данных по уклону (то же в расчетах по В.С. Кнорозу).

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$										Средняя оценка
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
Лапшин (1938) ($\alpha = 0,15$)											
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) ($\alpha = 0,30$)	1,03	0,69	0,37	0,48	0,35	0,19	0,53	1,01	0,53	0,50	0,57
А.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) ($\alpha = 0,45$)	0,88	0,61	0,31	0,43	0,32	0,16	0,46	0,85	0,46	0,42	0,49
В.С. Кнороз (1960)	3,43	1,11	4,37	0,71	0,19	0,94	$\frac{1}{34}$ $V < V_0$	4,22	–	1,63	–
Ю.М. Корчоха (1968)	0,51	$\frac{11}{14}$ $h_r < 0$	$\frac{7}{17}$ $h_r < 0$	$\frac{21}{21}$ $h_r < 0$	$\frac{11}{11}$ $h_r < 0$	$\frac{2}{2} h_r < 0$	$\frac{34}{34}$ $h_r < 0$	$\frac{11}{49}$ $h_r < 0$	$\frac{11}{42}$ $h_r < 0$	0,58	–
В.Ф. Пушкарев (1948)	2,38	0,93	$\frac{1}{17}$ $C_r < 0$	$\frac{1}{21}$ $C_r < 0$	0,45	0,33	1,01	2,40	0,94	1,59	–

Таблица 4.1 показала пригодной для расчета формулу (4.3) только во втором варианте, с использованием $V_0 = 2,8\sqrt[4]{d_{max}H}$ (в соответствии с формулой Талмазы [75]).

Как следует из таблицы 4.2, наилучшее соответствие расчетных данных фактическим для всего диапазона таблицы 2.3 демонстрирует формула Гончарова и Лапшина при $\alpha = 0,15$ (она дала результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 7 из 10 групп данных). Формулы остальных перечисленных выше авторов не дают приемлемых результатов для большинства групп данных измерений.

Следовательно, наряду с формулами (4.3) и (4.5) из формул других исследователей для практического использования в расчетах расхода и стока крупных донных наносов, движущихся в грядовой форме, можно рекомендовать только формулу В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938) при $\alpha = 0,15$.

В ходе настоящего исследования было также выяснено, что хорошее соответствие данным, представленным в таблице В.3, дают не только формулы (4.3) и (4.5), но и формулы для расчета расхода донных наносов, составленные различным сочетанием обобщенных зависимостей для высоты и скорости перемещения гряд, разработанных в ГГИ в разное время без разделения рек на равнинные и горно-предгорные. Были рассмотрены следующие сочетания (см. таблицы А.1 и А.2):

- сочетание формулы для скорости гряд З.Д. Копалиани (1989) с формулами для высоты гряд:
 - З.Д. Копалиани (1989),
 - А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006),
 - формулой (3.1),
 - Б.Ф. Смищенко (1980),
 - Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1989).
- сочетание формулы для скорости гряд Б.Ф. Смищенко, З.Д. Копалиани (1978) с теми же формулами.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета расхода донных наносов по формулам ГГИ, полученным в разное время (номера формул даны по таблицам А.2 и А.1)

Сочетание формул	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$										Средняя оценка
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
(17) и (12)	1,07	1,19	0,88	1,31	1,10	0,68	1,30	2,18	0,60	0,49	1,08
(17) и (17)	1,08	1,10	0,80	1,21	1,01	0,63	1,19	1,97	0,58	0,48	1,00
(17) и (3.1)	1,04	1,06	0,77	1,17	0,97	0,61	1,15	1,91	0,56	0,46	0,97
(17) и (11)	1,23	1,25	0,91	1,38	1,15	0,72	1,35	2,25	0,67	0,54	1,14
(17) и (13)	1,09	1,19	0,87	1,29	1,09	0,66	1,31	2,18	0,60	0,51	1,08
(16) и (12)	1,06	1,18	0,87	1,31	1,10	0,68	1,29	2,16	0,59	0,49	1,07
(16) и (17)	1,09	0,80	0,54	0,87	0,70	0,47	0,83	1,34	0,55	0,41	0,76
(16) и (3.1)	0,92	0,68	0,46	0,74	0,59	0,40	0,70	1,13	0,46	0,35	0,64
(16) и (11)	2,10	1,55	1,05	1,67	1,34	0,91	1,59	2,58	1,05	0,80	1,46
(16) и (13)	1,15	1,19	0,86	1,22	1,01	0,59	1,34	2,20	0,59	0,57	1,07

Как следует из таблицы 4.3, практически все сочетания формул ГГИ дают приемлемые результаты расчета.

В таблице 4.4 дается относительная погрешность расчета по рассмотренным в формулам $\Delta = \frac{|q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}}|}{q_{\text{Тизм}}} 100\%$.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов по отобранным формулам в пересчете на погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}}|}{q_{\text{Тизм}}} 100\%$

Формула	Оценка точности расчета										Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}} }{q_{\text{Тизм}}} 100\%$										
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
(4.3)	34	30	4/17 $V < V_0$	2/21 $V < V_0$	46	62	28	58	–	60	–
(4.3)-2	60	31	48	59	43	48	20	63	29	49	44
(4.5)	86	46	44	75	50	20	42	148	27	41	58
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) ($\alpha = 0,15$)	39	28	57	47	59	78	35	64	39	38	48
В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) ($\alpha = 0,30$)	26	34	63	52	65	81	47	50	47	50	51
А.Н. Гончаров,	26	39	69	57	68	84	54	46	54	58	56

Формула	Оценка точности расчета										Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}} }{q_{\text{Тизм}}} 100\%$										
	8- метровый лоток	30- метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара- Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
Г.Н. Лапшин (1938) ($\alpha = 0,45$)											
В.С. Кнороз (1960)	243	56	337	50	81	89	$\frac{1}{34}$ $V < V_0$	324	–	71	–
Ю.М. Корчوخа (1968)	50	$\frac{11}{14}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{7}{17}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{21}{21}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{11}{11}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{2}{2} h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{34}{34}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{11}{49}$ $h_{\text{Г}} < 0$	$\frac{11}{42}$ $h_{\text{Г}} < 0$	51	–
В.Ф. Пушкарев (1948)	139	23	$\frac{1}{17}$ $C_{\text{Г}} < 0$	$\frac{1}{21}$ $C_{\text{Г}} < 0$	55	67	15	153	22	63	–
(17) и (12)	27	38	43	52	47	32	38	154	53	53	54
(17) и (17)	27	34	44	51	42	37	30	134	52	53	50
(17) и (3.1)	26	32	44	49	40	39	28	129	53	54	49
(17) и (11)	34	40	43	58	49	28	41	157	47	50	55
(17) и (13)	28	38	45	53	46	34	38	154	53	51	54
(16) и (12)	27	38	43	52	46	32	37	153	53	53	53

Формула	Оценка точности расчета										Средняя оценка, %
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$										
	8- метровый лоток	30- метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара- Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
(16) и (17)	27	33	49	43	39	53	26	76	49	59	45
(16) и (3.1)	25	37	54	40	43	60	32	64	55	65	48
(16) и (11)	110	61	46	87	61	21	59	175	27	38	68
(16) и (13)	32	40	49	55	42	41	39	153	55	47	55

Таблица 4.4 подтверждает высокую результативность формул ГГИ и В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938), позволяющих рассчитывать расход донных наносов с погрешностью 60%. При этом формулу В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938) можно рекомендовать, как при $\alpha = 0,15$, так и при $\alpha = 0,30$ и $0,45$.

Таким образом, для практических расчетов расхода донных наносов в горно-предгорных реках в условиях диапазона гидравлических характеристик данных, представленных в таблице 2.3, можно рекомендовать формулы:

- В.Н. Гончарова и Г.Н. Лапшина (1938),
- формулу (4.3) с $V_0 = 2,8^4 \sqrt{d_{max} H}$,
- формулу (4.5),
- сочетания формулы (17) (таблица А.2) с формулами (11)-(13), (17) (таблица А.1) и (3.1),
- сочетания формулы (16) (таблица А.2) с формулами (12), (13), (17) (таблица А.1) и (3.1).

Все названные формулы позволяют рассчитывать расход донных наносов со средней погрешностью до 60%. При этом следует отметить, что в формулах для скорости перемещения гряд (16) и расхода донных наносов (4.5) не требуется определение значений неразмывающей скорости потока V_0 , также как и в формулах для расчета высоты гряд (11), (17) и (3.1). Этим, более простым, формулам можно отдать предпочтение для практических расчетов.

4.1.2 Расчеты по формулам, не учитывающим в явном виде характеристики гряд

Всего было проверено 80 формул отечественных (29) и зарубежных (51) исследователей (все они приведены в таблице А.4). Распределение формул по группам следующее:

1. Формулы, содержащие критерий начала движения, в качестве которого используются:
 - критическая скорость потока $q_T = f(V_0)$ – 16 формул,
 - критический расход воды $q_T = f(q_0)$ – 6 формул,
 - критическое безразмерное касательное напряжение на дне потока $q_T = f(\theta_0)$ – 33 формулы,
 - критический энергетический уклон $q_T = f(I_0)$ – 1 формула.
2. Вероятностный подход $q_T = f(P)$ – 4 формулы.

3. Подход, основанный на принципе равной подвижности наносов – 1 формула (Г. Паркер).
4. Регрессионные зависимости $q_T = f(x, y, \dots)$ – 19 формул.

Формулы, использующие безразмерный критерий Шильдса и безразмерную функцию Эйнштейна, проверялись в нескольких вариантах. Использовались следующие значения критического безразмерного касательного напряжения: θ_0 – по автору (если он предлагал собственное значение) или 0,06 – по Шильдсу и 0,03 – по Копалиани. Во всех группах данных, кроме 30-м лотка и Уильямса (для которых имеются гранулометрические кривые), в качестве характеристики грансостава во всех формулах, независимо от предлагаемой автором, назначался d или d_{50} (у Гая, Саймонса и Ричардсона). Формулы, использующие поправочные коэффициенты на неоднородность грунта, для 30-м лотка и Уильямса проверялись как с учетом, так и без учета таких коэффициентов.

Для оценки соответствия расчетных данных измеренным при сравнении формул использовалась оценка: $\Delta = \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}}$. Удовлетворительным был принят интервал: $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$, т.е. занижение или завышение результата расчетов в 2 раза и менее. Соответствие проверяемых формул конкретной группе экспериментальных данных оценивалось по значению Δ , осредненному по данной группе. В таблицах 4.5-4.7 приведены результаты расчетов по формулам, показавшим наилучшие результаты ($0,5 \leq \Delta \leq 2,0$).

Таблица 4.5 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 9 группах данных из 10

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{т\text{расч}}}{q_{т\text{изм}}}$									
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон
А.Ф. Кудряшов	2,07	1,87	0,67	1,96	1,61	0,97	1,33	1,61	1,28	0,54
В.Н. Лазарев, Ф.М. Чернышов (1974)	2,65	1,66	0,64	1,43	1,07	0,61	0,98	1,44	1,17	0,83

Таблица 4.6 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 7 группах из 10

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{т\text{расч}}}{q_{т\text{изм}}}$									
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон
А.Н. Бугаков (1998)	1,69	0,61	$\frac{1}{17}$ $V < V_0$	$\frac{2}{21}$ $V < V_0$	0,99	0,97	1,36	2,73	0,60	0,95

Таблица 4.7 – Результаты расчетов по формулам, показавшим результат $0,5 \leq \Delta \leq 2,0$ в 6 группах из 10

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$									
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Нюкжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон
М.А. Великанов	1,15	6,09	0,49	$\frac{1}{21}$ $V < V_0$	0,85	0,21	0,95	1,53	1,18	0,54
В.Ф. Галмаза (1963)	1,07	0,52	0,24	0,86	0,68	0,37	0,53	0,30	0,70	0,24
Х.А. Эйнштейн (1950) (по К.В. Гришанину)	1,04	0,57	3,80	0,50	0,13	0,50	2/34 нет данных	1,86	–	0,64

Формулы, представленные в таблицах 4.5-4.7, по критерию $0,5 \leq \Delta = \frac{q_{\text{Трасч}}}{q_{\text{Тизм}}} \leq 2,0$

показали устойчиво хороший результат для большого числа экспериментов и в среднем по всем группам исходных данных. Однако, если вычислить относительную погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}}|}{q_{\text{Тизм}}} 100\%$ расчетов по этим формулам, очевидно, что в целом они значительно менее эффективны, чем полученные с учетом рядовой структуры перемещения наносов (см. пункт 4.1.1). Результаты расчета относительной погрешности приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчетов по отобранным формулам в пересчете на погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$

Автор	Оценка точности расчета $\Delta = \frac{ q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}} }{q_{\text{изм}}} 100\%$										Средняя оценка, %
	8-метровый лоток	30-метровый лоток	р. Ньюжа	р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка	В.Ф. Пушкарев	Г.П. Уильямс	В.Н. Гончаров	Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон	
А.Ф. Кудряшов	107	91	44	118	86	11	36	82	38	47	66
В.Н. Лазарев, Ф.М. Чернышов (1974)	165	75	49	98	60	39	20	63	31	31	63
А.Н. Бугаков (1998)	70	42	$\frac{1}{17} V < V_0$	$\frac{2}{21} V < V_0$	38	24	40	199	48	47	–
М.А. Великанов	37	509	58	$\frac{1}{21} V < V_0$	51	79	30	85	41	46	–
В.Ф. Талмаза (1963)	33	49	76	55	51	63	47	70	36	76	56
Х.А. Эйнштейн (1950) (по К.В. Гришанину)	54	59	280	55	87	50	2/34 нет данных	120	–	41	–

Как следует из таблицы 4.8, устойчивую среднюю погрешность до 60% (аналогично формулам, учитывающим в явном виде гряды) дает только формула В.Ф. Талмазы. Таким образом, для практических расчетов расхода донных наносов в горно-предгорных реках при грядовой форме перемещения частиц из формул, не учитывающих в явном виде характеристики гряд, можно рекомендовать только формулу В.Ф. Талмазы (1963) [75] (полную запись формулы см. в таблице А.4):

$$q_T = \frac{\alpha \rho_T}{\sqrt{g}} V \sqrt{d} \left(\frac{d}{H}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \text{ кг/с/м}, V_0 = 2,8 \sqrt{d_{max} H}.$$

Аналогично главе 3, в данном разделе следует сделать вывод, что, как и для равнинных рек, для грядового движения донных наносов в горно-предгорных реках, методы, основанные на учете характеристик гряд в явном виде, более эффективны, чем остальные методы.

4.2 Расчеты расхода донных наносов при бесструктурной форме их перемещения в горно-предгорных реках

Всего было проверено 84 формулы, из них 29 проанализированы в России впервые, 14 опубликованы после 1990 г., 50 формул зарубежные. Распределение формул по группам следующее:

1. Формулы, содержащие критерий начала движения, в качестве которого используются:
 - критическая скорость потока $q_T = f(V_0)$ – 18 формул,
 - критический расход воды $q_T = f(q_0)$ – 7 формул,
 - критическое безразмерное касательное напряжение на дне потока $q_T = f(\theta_0)$ – 34 формулы,
 - критический энергетический уклон $q_T = f(I_0)$ – 1 формула.
2. Вероятностный подход $q_T = f(P)$ – 4 формулы.
3. Подход равной подвижности – 1 формула.
4. Регрессионные зависимости $q_T = f(x, y, \dots)$ – 19 формул.

Используемый в настоящем исследовании подход к анализу формул по сравнению с предыдущими работами по бесструктурному транспорту характеризуется следующими особенностями:

- Сопоставлялись не осредненные значения оценок точности расчета, а их конкретные значения отдельно для каждой стадии паводка, характеризуемой своей степенью вовлеченности в движение донных отложений.
- Для первых двух экспериментов (см. раздел 2.1.2.2) сравнивались формулы для двух смесей: по данным гранулометрического состава наносов на каждой стадии паводка и по данным исходного грунта донных отложений. Первый случай соответствует гранулометрическому составу, наблюдаемому в естественных руслах, второй – гранулометрическому составу, применяемому в практике лабораторных исследований и для инженерных расчетов, именно состав донных отложений часто служит основой для вывода формулы.
- Отдельное внимание в данной работе обращено на способы учета гранулометрического состава, используемые разными авторами, и на критические величины безразмерного касательного напряжения θ_0 . Это позволяет выявить, с какой характеристикой грансостава данная формула работает лучше, и выбрать наиболее эффективное значение критерия подвижности. Все формулы, использующие безразмерный критерий Шильдса и безразмерную функцию Эйнштейна, проверялись в нескольких вариантах. В качестве характеристики гранулометрического состава использовались средневзвешенный диаметр d и его медианное значение d_{50} , а также иное значение, если таковое предлагалось автором (например, d_{35} у Эйнштейна). Расчеты показали, что в случае неоднородного грунта разница между θ , рассчитанным по d и d_{50} , может составить 2 раза и более, следовательно, оно занижается или завышается в 2 раза (таблица 4.9). В ряде случаев в соответствии с требованиями авторов расчеты велись пофракционно (формулы С.Б. Брауна, К.И. Россинского и др.). Критические значения безразмерного касательного напряжения использовались следующие: θ_0 – по автору (если он предлагал собственное) или 0,06 – по Шильдсу и 0,03 – по Копалиани [37]. В таблице 4.10 приведены результаты сравнения критических значений касательного напряжения, предложенных Шильдсом (0,06) и Копалиани (0,03), с фактическими значениями этой величины. Сравнение проведено для грансостава наносов и грансостава донных отложений (первый и второй эксперименты) путем расчетов θ через средневзвешенный d и медианный d_{50} диаметр. Единица (1) означает, что измеренное значение касательного напряжения θ больше предлагаемого критического θ_0 , т.е. критерий работает удовлетворительно. Ноль (0) – противоположную ситуацию ($\theta < \theta_0$). Таблица показывает, что критическое значение

θ_0 , предложенное Шильдсом, для данных гидравлических условий является завышенным.

- Также проверялась эффективность поправок на неоднородность грунта (сравнивались расчеты с поправочным коэффициентом и без поправки).

Таблица 4.9 – Соотношение основных характеристик гранулометрического состава в используемых экспериментах

Первый эксперимент. Грансостав наносов				Второй эксперимент. Грансостав наносов						
$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$\frac{d_{50}}{d}$	$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$\frac{d_{50}}{d}$			
0,66	0,07	0,02	0,31	0,83	0,14	0,131	0,94			
0,94	0,07	0,03	0,39	0,99	0,15	0,135	0,90			
1,10	0,10	0,06	0,61	1,38	0,15	0,137	0,91			
1,60	0,12	0,08	0,63	1,87	0,15	0,137	0,91			
1,87	0,13	0,08	0,60	2,15	0,15	0,134	0,89			
2,31	0,13	0,08	0,60	2,48	0,15	0,135	0,90			
2,64	0,13	0,08	0,65							
Первый эксперимент. Грансостав донных отложений				Второй эксперимент. Грансостав донных отложений				Третий эксперимент. Грансостав донных отложений		
	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$\frac{d_{50}}{d}$		$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$\frac{d_{50}}{d}$	$d, \text{ мм}$	$d_{50}, \text{ м}$	$\frac{d_{50}}{d}$
	0,11	0,061	0,55		0,14	0,132	0,94	0,0014	0,00076	0,54

Таблица 4.10 – Проверка эффективности основных значений критического касательного напряжения в используемых экспериментах

θ_0	Проверка		θ_0	Проверка		θ_0	Проверка		θ_0	Проверка	
	d	d_{50}		d	d_{50}		d	d_{50}		d	d_{50}
Первый эксперимент. Наносы						Первый эксперимент. Донные отложения					
0,06	0	1	0,03	1	1	0,06	0	0	0,03	0	1
0,06	0	1	0,03	1	1	0,06	0	1	0,03	1	1
0,06	0	1	0,03	1	1	0,06	0	1	0,03	1	1
0,06	0	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1

θ_0	Проверка		θ_0	Проверка		θ_0	Проверка		θ_0	Проверка	
	d	d_{50}		d	d_{50}		d	d_{50}		d	d_{50}
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
Второй эксперимент. Наносы						Второй эксперимент. Донные отложения					
0,06	0	0	0,03	1	1	0,06	0	0	0,03	1	1
0,06	0	0	0,03	1	1	0,06	0	0	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
0,06	1	1	0,03	1	1	0,06	1	1	0,03	1	1
						Третий эксперимент. Донные отложения					
						0,06	0	0	0,03	0	1
						0,06	0	0	0,03	1	1
						0,06	0	1	0,03	1	1
						0,06	0	1	0,03	1	1
						0,06	0	1	0,03	1	1
						0,06	0	1	0,03	1	1
						0,06	1	1	0,03	1	1
						0,06	1	1	0,03	1	1
						0,06	1	1	0,03	1	1
						0,06	1	1	0,03	1	1

Оценка формул производилась с помощью критерия $\Delta = \frac{q_{\text{трасч}}}{q_{\text{тизм}}}$. Интервалом допустимой точности было выбрано занижение или завышение результата не более чем в два раза, т.е. $0,5 \leq \Delta \leq 2$.

Анализ выполненных расчетов показал, что ни одна из формул не дала названный результат ($0,5 \leq \Delta \leq 2$) на всех стадиях паводков во всех трех экспериментах. Формула признавалась удовлетворительной, если давала результат в пределах выбранной точности на 5 из 7 стадий первого эксперимента, 4 из 6 стадий второго эксперимента или 7 из 11

стадий третьего эксперимента (и более). Такой подход к отбору дал следующие результаты:

- 41 формула из всех не дала удовлетворительного результата ни в одном эксперименте;
- 4 формулы дали удовлетворительный результат только для условий первого эксперимента;
- 4 формулы – только для условий второго эксперимента;
- 9 формул удовлетворили только третьему эксперименту;
- только 8 формул (< 10%) дали удовлетворительные результаты для всех трех экспериментов.

Формулы, удовлетворяющие всем трем экспериментам:

1. Формулы, удовлетворяющие всем трем экспериментам при обоих видах гранулометрического состава (в двух первых экспериментах):

а) Л.Г. Гвелесиани (1946) [82] (рисунки 4.2-4.6):

$$q_T = 12,95 \frac{dV_0}{\left(\lg \frac{12d_{max}+d}{d}\right)^2} \left(\frac{V^3}{V_0^3} - 1\right) \left(\frac{V}{V_0} - 1\right) \text{ кг/с/м, } V_0 = 3,4 \frac{\lg\left(\frac{8,8H}{d}\right)}{\lg\left(\frac{12d_{max}+d}{d}\right)} \sqrt{d} \text{ м/с}$$

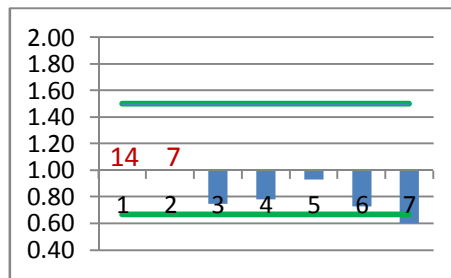


Рисунок 4.2 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Л.Г. Гвелесиани.

Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов

Примечание – На рисунках 4.2-4.20 на оси абсцисс отложены стадии эксперимента, на оси ординат – значения оценки Δ . Горизонтальными линиями отмечены границы $\Delta = 0,75$ и $\Delta = 1,5$. Красными или синими цифрами отмечены значения Δ , выходящие за рамки принятого интервала (красный – $\Delta > 2$, синий – $\Delta < 0,5$)

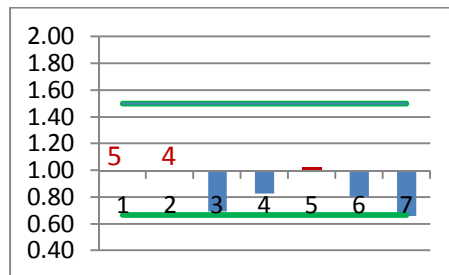


Рисунок 4.3 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Л.Г. Гвелесиани.

Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений

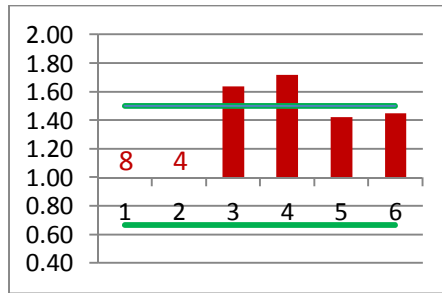


Рисунок 4.4 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Л.Г. Гвелесиани.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов

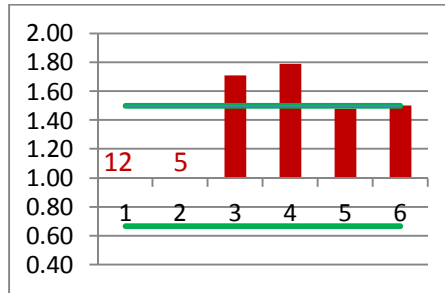


Рисунок 4.5 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Л.Г. Гвелесиани.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений

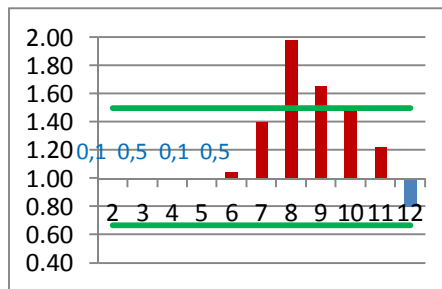


Рисунок 4.6 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Л.Г. Гвелесиани.

Третий эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений

Формула дает хорошие результаты на 5 из 7 стадий первого эксперимента и 4 из 6 стадий второго эксперимента при обоих видах грансостава, в третьем эксперименте на 7 из 11 стадий, поэтому мы можем рекомендовать вести расчеты по ней, используя во всех случаях грансостав донных отложений.

b) И.И. Леви (1957) [13] (рисунки 4.7-4.16):

$$q_T = 0,00076 \left(\frac{V}{\sqrt{gd_{50}}} \right)^3 d_{50} (V - V_0) \left(\frac{d_{90}}{H} \right)^{0,25} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м},$$

для квадратичной области ($Re_d > 25$, $d_{50} > 1 \dots 1,5$ мм):

$$V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0} \text{ м}/\text{с}, V_{*0} = 0,16 \sqrt{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) g d_{50}} \text{ м}/\text{с}$$

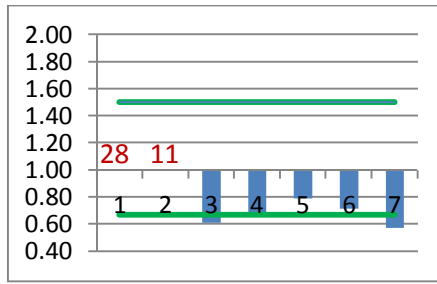


Рисунок 4.7 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$

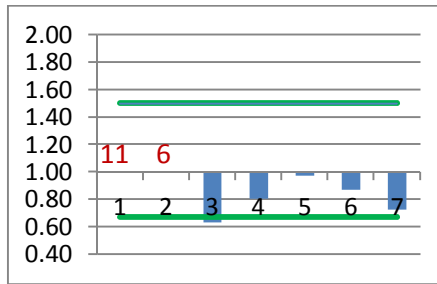


Рисунок 4.8 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений, $V_0 =$

$$\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

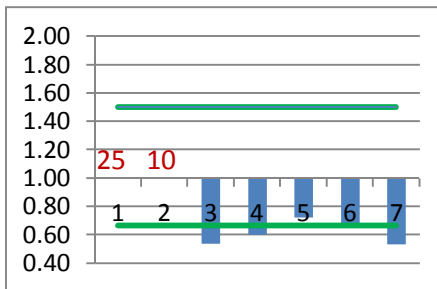


Рисунок 4.9 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$

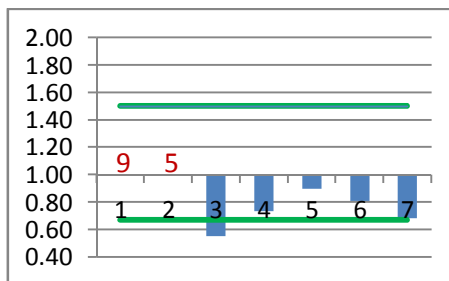


Рисунок 4.10 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

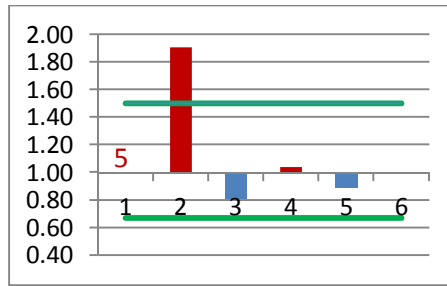


Рисунок 4.11 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов,

$$V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} \frac{C}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

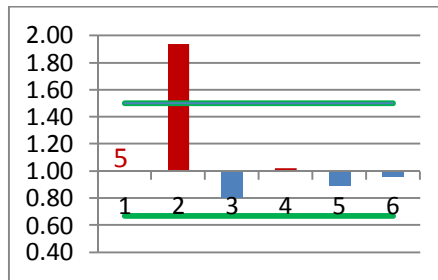


Рисунок 4.12 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

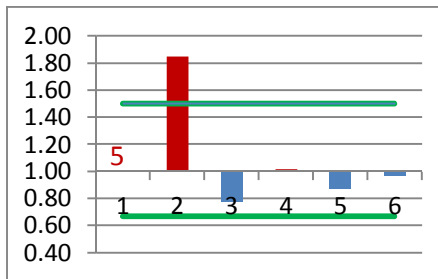


Рисунок 4.13 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных наносов,

$$V_0 = \frac{C}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

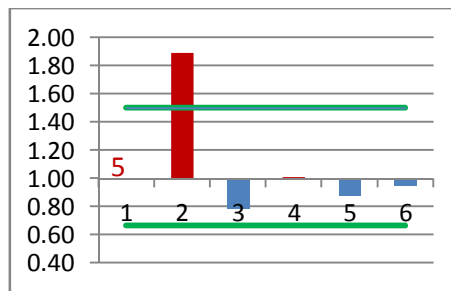


Рисунок 4.14 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

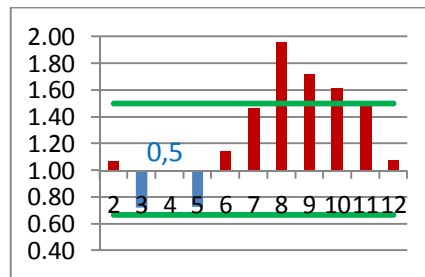


Рисунок 4.15 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Третий эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

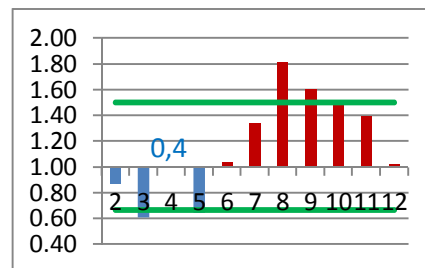


Рисунок 4.16 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле И.И. Леви. Третий эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$$

Формула дает хорошие результаты 5 из 7 стадий первого эксперимента и 5 из 6 стадий второго эксперимента для обоих видов грансостава, в третьем эксперименте на 10 из 11 стадий. Это позволяет рекомендовать расчеты по ней с гранулометрией донных отложений. Поправочный коэффициент при неразмывающей скорости на неоднородность гранулометрического состава $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1}$ не дает существенного улучшения результата, поэтому можно его не вводить.

2. Формула, давшая хороший результат в трех экспериментах только для грансостава донных отложений (в двух первых экспериментах) – формула Г.И. Шамова (1952) [82] – с поправкой при неразмывающей скорости на неоднородность грунта В.Н. Лазарева и Ф.М. Чернышова [51] (рисунки 4.17-4.20):

$$q_T = \alpha \sqrt[3]{d_{max}^2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} \text{ кг/с/м, } V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}} \text{ м/с.}$$

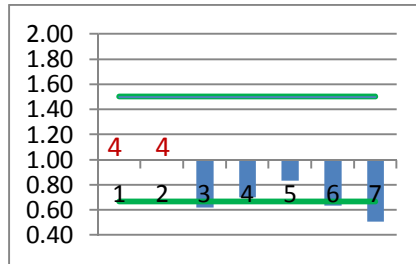


Рисунок 4.17 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Г.И. Шамова.

Первый эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$$

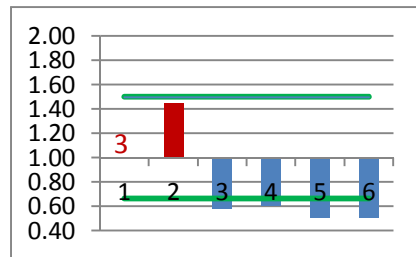


Рисунок 4.18 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Г.И. Шамова.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = 3,83 d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$$

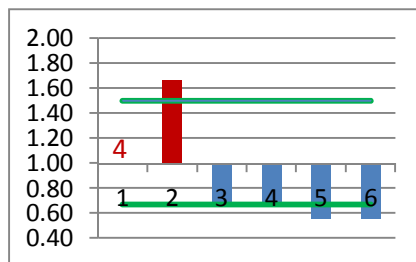


Рисунок 4.19 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Г.И. Шамова.

Второй эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$$

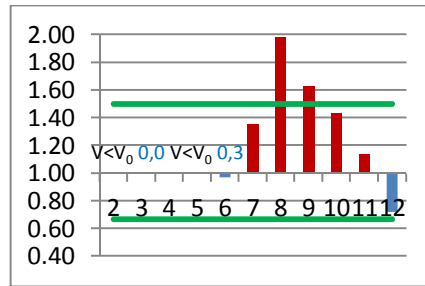


Рисунок 4.20 – Результаты расчета расхода донных наносов по формуле Г.И. Шамова.

Третий эксперимент, использован гранулометрический состав донных отложений,

$$V_0 = 3,83d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}}$$

Формула дала хорошие результаты на 5 из 7 стадий первого эксперимента с поправочным коэффициентом и 5 из 6 стадий второго эксперимента с поправкой и без поправки, в третьем эксперименте – на 7 из 11 стадий только без поправки.

Представление результатов расчета через относительную погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}}|}{q_{\text{изм}}} 100\%$ подтверждает высокую эффективность названных формул: при развитии транспорте наносов средняя погрешность вычислений по ним составляет 30-45% (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Результаты расчетов по отобранным формулам в пересчете на погрешность $\Delta = \frac{|q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}}|}{q_{\text{Тизм}}} 100\%$

Автор	Оценка точности расчета												Средняя оценка, % ¹⁴	
	$\Delta = \frac{ q_{\text{Трасч}} - q_{\text{Тизм}} }{q_{\text{Тизм}}} 100\%$													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Л.Г. Гвелесиани (1946)	Первый эксперимент, гранулометрический состав донных наносов												43	
	1264	636	25	22	7	27	40	–	–	–	–	–		24
	Первый эксперимент, гранулометрический состав донных отложений													
	384	306	31	17	2	19	34	–	–	–	–	–		21
	Второй эксперимент, гранулометрический состав донных наносов													
	735	345	64	72	43	45	–	–	–	–	–	–		56
	Второй эксперимент, гранулометрический состав донных отложений													
	1094	375	71	79	48	50	–	–	–	–	–	–		62
Третий эксперимент, гранулометрический состав донных отложений														
	–	86	55	88	51	5	40	98	65	47	22	20	52	
И.И. Леви (1957)	Первый эксперимент, гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$												30	
	2722	996	39	33	21	28	43	–	–	–	–	–		33
	Первый эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													

¹⁴ Осреднение выполнено для стадий развитого транспорта наносов.

Автор	Оценка точности расчета											Средняя оценка, % ¹⁴	
	$\Delta = \frac{ q_{\text{трасч}} - q_{\text{тизм}} }{q_{\text{тизм}}} 100\%$												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1010	497	37	19	3	13	27	–	–	–	–	–	–	20
Первый эксперимент, гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
2425	903	46	40	28	33	47	–	–	–	–	–	–	39
Первый эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
752	406	45	27	10	19	32	–	–	–	–	–	–	27
Второй эксперимент, гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
391	91	19	4	11	1	–	–	–	–	–	–	–	25
Второй эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
384	94	20	2	11	4	–	–	–	–	–	–	–	26
Второй эксперимент, гранулометрический состав донных наносов, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
374	85	22	2	12	3	–	–	–	–	–	–	–	25
Второй эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
367	89	22	1	12	5	–	–	–	–	–	–	–	26
Третий эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$													
–	7	28	52	27	15	46	96	72	62	48	8	–	42

Автор	Оценка точности расчета												Средняя оценка, % ¹⁴
	$\Delta = \frac{ q_{\text{тр.расч}} - q_{\text{тр.изм}} }{q_{\text{тр.изм}}} 100\%$												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Г.И. Шапов (1952)	Третий эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = \frac{C}{\sqrt{g}} V_{*0}$												
	–	13	39	58	35	4	35	82	61	52	40	3	38
	Первый эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$												
	320	303	38	30	17	36	49	–	–	–	–	–	34
	Второй эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = 3,83 d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$												
	196	45	42	39	49	49	–	–	–	–	–	–	45
	Второй эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$												
	257	67	35	32	44	44	–	–	–	–	–	–	44
Третий эксперимент, гранулометрический состав донных отложений, $V_0 = 3,83 d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$													
–	231	93	118	69	3	36	98	63	43	14	28	57	

3. Формулы А.Д. Абрахамса и П. Гао (2006), Дж. Фредзо и Р. Дейгаарда (1992), Я.С. Рибберинка (1998), К.Б. Брауна (1950), и Г. Паркера (1979) (см. таблицу А.4) также дали положительные результаты, но с различными оговорками. Это либо изменение характеристики гранулометрического состава с d на d_{50} или наоборот, либо удовлетворительный результат в каком-то эксперименте получен только для грансостава наносов, который, как правило, неизвестен.

Таким образом, из выполненного выше анализа следует, что для расчетов расхода донных наносов в горно-предгорных реках при бесструктурной форме транспорта наносов из проверенных 84 формул можно рекомендовать использовать формулы: Л.Г. Гвелесиани (1946), И.И. Леви (1957) и Г.И. Шамова (1952). Средняя погрешность вычислений по этим зависимостям составляет 30-45%.

Анализ результатов показал следующее:

- На первых двух стадиях первого и второго экспериментов и на первых двух-четырёх стадиях третьего эксперимента почти все формулы неработоспособны. Это говорит о том, что в начальной стадии движения донных наносов связь между характеристиками наносов и гидравликой потока очень слабая и носит неопределенный характер. Это было показано и в предыдущих отечественных и зарубежных работах [42, 126].
- Выявлены формулы, дающие при развитии транспорте наносов (когда движется вся смесь) приблизительно одинаково хороший результат как при использовании грансостава наносов, так и при использовании грансостава донных отложений. Это говорит о наличии определенной и существенной связи при развитии транспорте наносов между грансоставом и гидравлическими характеристиками потока.
- В случаях неоднородного состава донных отложений выбор характеристики грансостава (d , d_{50} или др.) в формулах, основанных на использовании θ_0 , существенно влияет на результаты расчета.
- Расчеты показали, что критическое значение θ_0 , предложенное Шильдсом, для условий горной реки является завышенным (для донных отложений при расчетах с d на 3 из 7 стадий первого эксперимента, 2 из 6 стадий второго эксперимента и 6 из 11 стадий третьего эксперимента рассчитанное значение θ получалось меньше 0,06; для d_{50} – на 1 из 7 стадий первого эксперимента, 2 из 6 стадий второго эксперимента и 2 из 11 стадий третьего эксперимента).
- Выявлены формулы, для которых введение поправок на неоднородность грунта типа $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}$ существенного влияния на результат расчета не оказывает (формула И.И. Леви).

Следует добавить, что расчет по трем рекомендуемым формулам с использованием данных первого эксперимента в реальных единицах природы (1:80) подтверждает сделанные выводы (таблица 4.12), что соответствует теории подобия. Только формула Шамова показала некоторое ухудшение результата (средняя погрешность в первом эксперименте возросла с 34% до 42%), и таким образом общая погрешность по трем формулам находится в диапазоне 30-47%.

Таблица 4.12 – Результаты расчетов по отобранным формулам с использованием данных первого эксперимента, пересчитанных на реальный масштаб природы

Оценка точности расчета	Стадия паводка							Средняя оценка (для 3-7 стадий)
	1	2	3	4	5	6	7	
Л.Г. Гвелесиани (1946), грансостав донных наносов								
Δ_1	1295	579	27	24	4	25	40	24
Δ_2	13,95	6,79	0,73	0,76	0,96	0,75	0,60	
Л.Г. Гвелесиани (1946), грансостав донных отложений								
Δ_1	382	304	31	17	2	20	34	21
Δ_2	4,82	4,04	0,69	0,83	1,02	0,80	0,66	
И.И. Леви (1957), грансостав донных наносов, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$								
Δ_1	2712	995	39	34	21	28	43	33
Δ_2	28,12	10,95	0,61	0,66	0,79	0,72	0,57	
И.И. Леви (1957), грансостав донных отложений, $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$								
Δ_1	1006	495	37	20	3	13	28	20
Δ_2	11,06	5,95	0,63	0,80	0,97	0,87	0,72	
И.И. Леви (1957), грансостав донных наносов, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$								
Δ_1	2417	902	46	40	28	33	47	39
Δ_2	25,17	10,02	0,54	0,60	0,72	0,67	0,53	
И.И. Леви (1957), грансостав донных отложений, $V_0 = \frac{c}{\sqrt{g}} V_{*0}$								
Δ_1	749	405	45	27	11	19	32	27
Δ_2	8,49	5,05	0,55	0,73	0,89	0,81	0,68	
Г.И. Шамов (1952), грансостав донных отложений, $V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$								
Δ_1	265	253	45	38	27	44	55	42
Δ_2	3,65	3,53	0,55	0,62	0,73	0,56	0,45	
Примечание – $\Delta_1 = \frac{ q_{\text{расч}} - q_{\text{изм}} }{q_{\text{изм}}} 100\%$, $\Delta_2 = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}}$.								

Глава 5. Локальные зависимости для расчета расхода донных наносов в реках

Точность расчета расхода донных наносов по обобщенным формулам, как следует из изложенного выше, составляет в лучшем случае 1,5-2 раза. В этих условиях большое значение приобрело получение региональных (для рек конкретного физико-географического региона) и локальных (получаемых для конкретного створа и характеризующих морфологически однородный участок) формул. Анализируя сложившуюся в литературе ситуацию с методами оценки расхода и стока донных наносов в реках, К.В. Гришанин в работе [16] пишет: «Единственный возможный в настоящее время выход из этого положения состоит в создании и применении региональных формул расхода наносов. Эти формулы должны иметь максимально простую структуру и не содержать более одного-двух эмпирических параметров. Отражая в недифференцированной форме влияние всей совокупности местных условий, эти значения будут действительны лишь в пределах того участка реки, где сделаны измерения», – и там же, ниже: «Применение региональных формул есть, разумеется, временная мера, обусловленная недостатком наших знаний о транспорте наносов. Она не должна внушать пессимистического отношения к возможностям теории. Накопление региональных зависимостей может дать полезный материал для обобщений». Точность расчета по локальным формулам в отдельных случаях достигает 100%.

В таблице А.5 представлены собранные в отечественной и зарубежной литературе региональные и локальные формулы. По структуре эти формулы можно разделить на простейшие, представляющие собою выражения типа $Q_T = f(Q)$ или $Q_T = f(V)$, таких формул большинство (А.Г. Гвелисиани и Н.П. Шмальцель (1968), Я. Богарди (1978), Ш.В. Джаошвили (1986) и др.). Остальные формулы (7 авторов из 22) делятся на те же типы, что и представленные в таблице А.4. Формулы, приведенные в таблице А.5, получены как для равнинных рек разной величины (И.Л. Розовский, В.А. Базилевич и Е.В. Еременко (1967) – для р. Днепр, Г.В. Лопатин (1937) – в том числе для р. Луги), так и для горно-предгорных рек (В.В. Ромашин (1990) – для рек зоны Черноморского побережья Кавказа).

В рамках НИР, проводимых ОРП, были получены локальные зависимости для рек: Юга (вблизи г. Великого Устюга), Тосны (г. Тосно), Луги (г. Луга, п. Толмачево, г. Кингисепп) и Шелони (г. Порхов, ст. Заполье). Особенностью вывода этих зависимостей является то обстоятельство, что они получены не на основе целевых многолетних наблюдений, а путем использования данных гидрологических ежегодников и единичных

измерений (в случае р. Юг измерялись гидравлические характеристики и гранулометрический состав, а в случае прочих объектов определялся только грансостав). Такой способ получения локальной зависимости значительно менее точен по сравнению с выводом формулы на основе целевых длительных наблюдений, однако можно считать его удовлетворительным, если речь идет не о точных расчетах, а об оценке расхода и стока донных наносов.

Вывод всех указанных формул был основан на положении, что транспорт донных наносов в равнинных реках осуществляется в виде микроформ-гряд, формирующихся макротурбулентным спектром пульсаций руслового потока. Длина этих гряд в состоянии динамического равновесия составляет 2-10 глубин, а высота – 0,06-0,20 глубины потока [33, 73].

В 1978 г. в ГГИ было выполнено обобщение данных измерений скорости перемещения гряд этого типа в русловых потоках [73]. Был использован большой массив данных измерений, накопленный к этому времени в ГГИ, а также существующие в литературе иные источники.

На координатное поле $\frac{V}{C_r} = f(Fr)$, где V – скорость потока над грядой, C_r – скорость ее перемещения, а $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда, были нанесены данные измерений ГГИ в реках: Волге, Вычегде, Иртыше, Днепре, Дунае, Селенге, Дону, Поломети и в Каракумском канале, а также данные других исследователей по рекам Миссисипи, Амударье, Хии и земляным каналам Центральной Азии (Таш-Сака и Кыз-Кеткен). На этот же график были нанесены данные, полученные в лабораторных экспериментах В.Н. Гончарова, В.Ф. Пушкарева, З.Д. Копалиани, В.К. Дебольского, Н.С. Знаменской, Х.П. Гая, Д.Б. Саймонса и И.В. Ричардсона по грядовому движению наносов, а также данные измерений скорости перемещения гряд устойчивого профиля, полученные на размываемых физических моделях рек Волги, Иртыша, Амура, Ньюжи и Терешки в Русловой лаборатории ГГИ.

Аппроксимация этих данных измерений дала кривую гиперболического типа, соответствующую выражению $C_r = 0,019VFr^3$.

На рисунке 5.1 изображена указанная кривая, но без точек, на основе которых она была построена. На этот график нанесены данные натуральных измерений ГГИ и МГУ (р. Днестр), а также лабораторных экспериментов в гидравлическом лотке и на размываемых физических моделях, проведенных после опубликования зависимости

$\frac{V}{C_T} = f(Fr)$ в 1978 г. Как следует из рисунка 5.1, новые независимые данные хорошо соответствуют этой кривой.



Рисунок 5.1 – Кривая $C_T = 0,019VFr^3$ на фоне независимых данных

Для установления локальных зависимостей расхода донных наносов в равнинных реках при грядовой форме их перемещения за основу принята зависимость $C_T = 0,019VFr^3$.

Из множества структур формул расхода донных наносов при поиске локальной зависимости для конкретной реки наиболее подходящей, очевидно, следует признать структуру формулы Шоклича [130], связывающей расход донных наносов с текущим расходом воды, критическим расходом воды, при котором начинается движение донных частиц, а также их крупностью и уклоном дна $Q_T = f(Q, Q_0, I, d)$. Поскольку эти характеристики для конкретного участка реки меняются мало или в узких пределах, расход донных наносов на нем оказывается зависимым только от расхода воды $Q_T = f(Q)$. Поэтому в качестве базовой структуры для искомых формул нами было принято выражение $Q_T = f(Q)$.

5.1 Расчеты расхода донных наносов в р. Юг

Для решения задачи расчета расхода донных наносов в р. Юг на спаде половодья, непосредственно после прохождения ледохода (в период с 07 по 16 мая 2014 г.), были выполнены полевые работы на устьевом ее участке, в 2,5-3,3 км выше впадения в р. Сухону (рисунок 5.2).

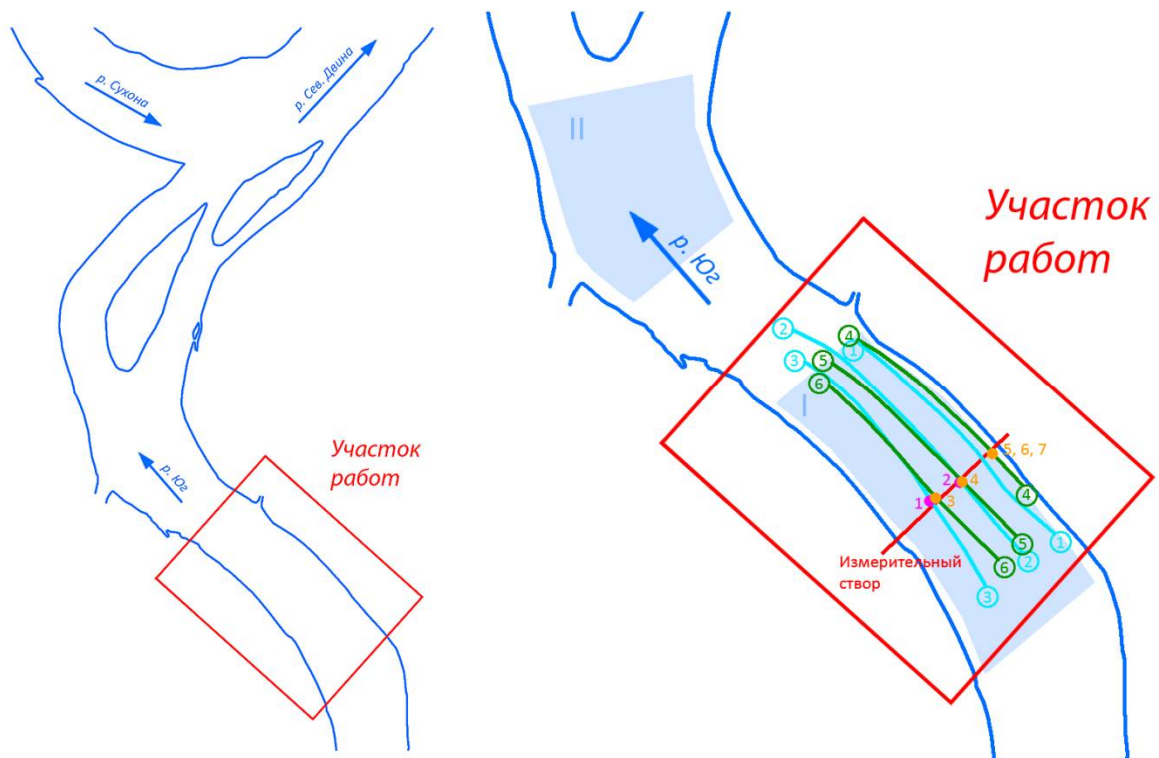


Рисунок 5.2 – Схематический план участка натурных исследований ГГИ на р. Юг (май 2014 г.)

Примечание – Линии 1-6 – положение продольных профилей эхолотирования дна, точки 1-7 – места отбора проб донных отложений

В 3 км от устья был назначен гидрометрический створ, в котором 12 мая 2014 г. проведены измерения поперечного профиля и скоростей течения. Выполнен расчет расхода воды Q , который составил $1460 \text{ м}^3/\text{с}$.

Трижды в течение 10 дней измерялся уклон водной поверхности, значение которого менялось от 0,00023 до 0,00028. Расчетным было принято значение 0,00023, соответствующее дате работ в гидрометрическом створе.

Для измеренного расхода воды по формуле Шези $V = C\sqrt{HI}$ был определен коэффициент Шези $C = 53,9$, а по формуле Маннинга $C = \frac{1}{n}H^{\frac{1}{6}}$ был вычислен

коэффициент шероховатости $n = 0,023$. Эти данные были использованы как опорные для расчета расходов воды при различных уровнях наполнения русла.

При заданных уровнях воды (глубинах потока), по известному значению уклона водной поверхности $I = 0,00023$ и коэффициента шероховатости $n = 0,023$ определялся коэффициент Шези, а затем соответствующие заданной глубине значения средних и максимальных скоростей потока в поперечном сечении русла. Далее по формуле $Q = V\omega$, где ω – площадь поперечного сечения, вычислялся расход воды, соответствующий заданной глубине потока.

В расчетах скорости потока при уровнях (глубинах) воды, представленных в таблице 5.1, использовался установленный в гидрометрии для экстраполяции кривых расходов факт, что коэффициент Шези и уклон водной поверхности при высоких наполнениях русла приобретают постоянные значения [70]. Поэтому и коэффициент шероховатости n для трех наибольших расходов (при которых вода выходит на пойму) был принят равным $n = 0,023$.

Таблица 5.1 – Гидравлические характеристики потока в створе гидрометрических измерений на р. Юг (при измеренном уклоне водной поверхности $I = 0,00023$)

Расход воды Q , м ³ /с	Средняя глубина H , м	Максимальная глубина $H_{\text{макс}}$, м	Средняя скорость V , м/с	Максимальная скорость $V_{\text{макс}}$, м/с	Коэффициент Шези C	Коэффициент шероховатости n	Ширина русла B , м	Площадь водного сечения ω , м ²
18,7	0,60	1	0,39	0,51	32,50	0,029	79	47,4
67,1	1,06	1,3	0,61	0,6	36,94	0,029	104	110,5
133	1,43	2,3	0,75	0,88	39,29	0,029	123	176,15
323	1,79	3,35	0,94	1,14	41,51	0,027	192	343,3
1460	2,60	5,7	1,37	1,65	53,90	0,023	410	1066,3
2905	4,10	7,2	1,73	1,99	58,15	0,023	410	1681,3
3961	5,10	8,2	1,89	2,27	58,15	0,023	410	2091,3

С целью обнаружения и измерения геометрических характеристик гряд на исследуемом участке было выполнено эхолотирование дна русла по трем продольникам: вдоль правого берега, в середине русла и вдоль левого берега. Положение продольников эхолотирования дна дано на рисунке 5.2.

Измерения показали, что микроформы-гряды на р. Юг представлены грядами типа дюн с относительными высотой $\frac{h_r}{H} = 0,05-0,14$ и длиной $\frac{l_r}{H} = 1,05-2,45$.

В разных точках гидрометрического створа отобрано 7 проб донных отложений (1-я и 2-я пробы отобраны 12 мая, 3-7-я – 16 мая). Определен их гранулометрический состав. Пробы разделены на взятые в мелководной и средней части русла ($d = 0,25 \dots 0,40$ мм – состав, близкий к однородному ($\frac{d_{90}}{d_{10}} \leq 3,0$)) и глубоководной части русла ($d = 1,70 \dots 15,0$ мм – неоднородный состав ($\frac{d_{90}}{d_{10}} = 16-21$)).

Оценка степени подвижности руслового материала производилась для крупности донных отложений $d_{cp} = 0,98$ мм, вычисленной как среднее из средневзвешенных диаметров пяти проб (3-7-й). Условия подвижности донных отложений в измерительном створе на р. Юг оценивались по методам В.Н. Гончарова [20, 80] и А. Шильдса [99].

Для определения неразмывающей скорости потока по Гончарову использовалась формула:

$$V_0 = 3,0H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \quad (5.1)$$

где d дано в м.

Как следует из таблицы 5.2 критерий подвижности $\frac{V}{V_0}$, рассчитанный по формуле Гончарова для разных расходов воды, принимает значения от 0,89 (донный материал не движется) до $\frac{V}{V_0} = 2,79$, когда донный материал начинает сальтировать у дна.

В соответствии с [20], значение критерия подвижности $\frac{V_*}{W} = 0,34-0,99$ также отвечает условиям движения частиц в форме донного влечения.

На рисунке 5.3 данные таблицы 5.2 представлены на фоне кривой начала движения Шильдса. Расчетные точки расположены значительно выше кривой Шильдса, что подтверждает неприменимость подхода критического касательного напряжения к равнинным рекам, выявленную в третьей главе.

Таблица 5.2 – Характеристика подвижности донных отложений в створе гидрометрических измерений на р. Юг (при $d_{cp} = 0,98$ мм, гидравлической крупности $w = 0,11$ м/с, $I = 0,00023$)

Расход воды, Q , м ³ /с	Средняя глубина, H , м	$\frac{H}{d_{cp}}$	Динамическая скорость потока, V_* , м/с	Число Рейнольдса (по динамической скорости потока), $Re_{*d_{cp}}$	Коэффициент Шильдса, θ_0	по Гончарову		$\frac{V_*}{w}$	Число Фруда, Fr
						Неразмывающая скорость потока, V_0 , м/с	$\frac{V}{V_0}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19	0,60	612	0,04	27,5	0,09	0,44	0,89	0,34	0,16
67	1,06	1084	0,05	36,6	0,15	0,50	1,22	0,45	0,19
133	1,43	1461	0,06	42,5	0,20	0,53	1,43	0,52	0,20
323	1,79	1825	0,06	47,5	0,25	0,55	1,71	0,58	0,22
1460	2,60	2654	0,08	57,3	0,37	0,59	2,31	0,70	0,27
2905	4,10	4184	0,10	72,0	0,58	0,65	2,66	0,88	0,27
3961	5,10	5205	0,11	80,3	0,73	0,68	2,79	0,99	0,27

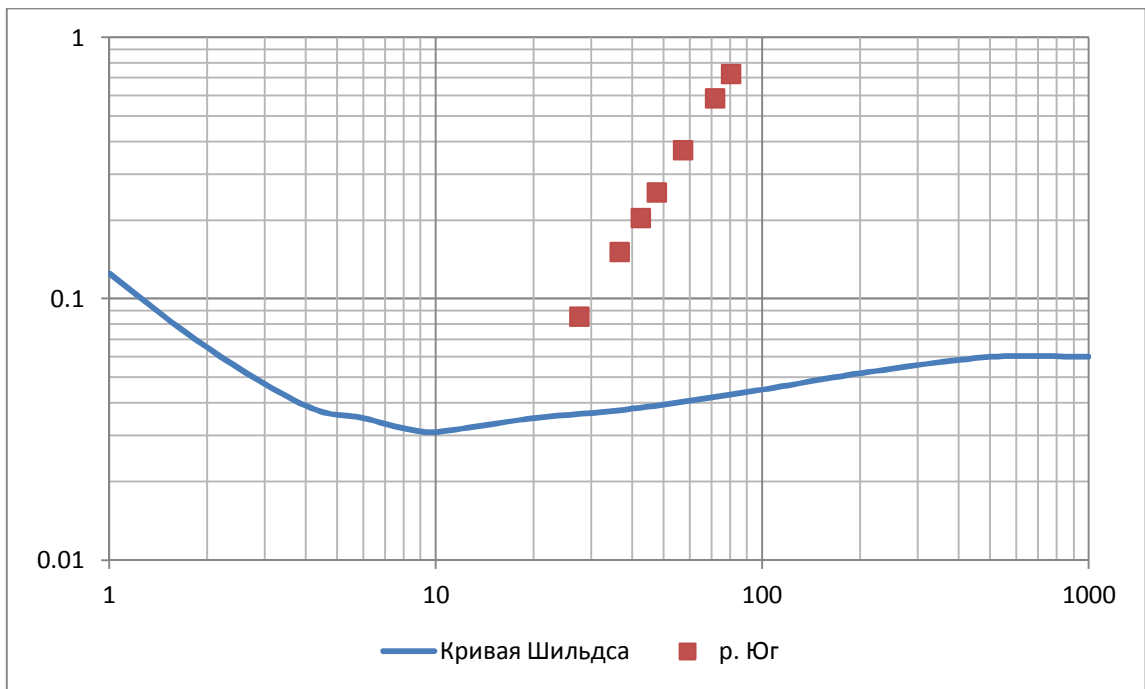


Рисунок 5.3 – Степень подвижности донных наносов в измерениях в р. Юг относительно кривой начала движения Шильдса

В таблице 5.3 представлены результаты расчета расхода донных наносов р. Юг в створе измерений по данным осредненных по поперечному сечению гидравлических характеристик потока для семи различных уровней наполнения русла, т.е. расходов воды. Согласно рекомендациям главы 3, значения высоты гряд вычислялись по формуле $h_r = 0,11H$ (3.1), скоростей перемещения гряд – по формуле $C_r = 0,019VFr^3$ (4.1), а элементарный расход донных наносов по зависимости $q_r = \alpha h_r C_r$ (1.3). Значения q_r в графе 8 записаны в $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$ в рыхлом теле, т.е. с порами. Значения полного расхода донных наносов в расчетном поперечном сечении русла, представленные в графе 9, получены умножением значений q_r на 0,7 (для перевода значений расхода донных наносов из рыхлого в плотное тело), на 86400 (число секунд в сутках) и на ширину русла B .

Таблица 5.3 – Расчет расхода донных наносов в р. Юг

Расход воды, Q , м ³ /с	Средняя глубина потока, H , м	Средняя скорость потока, V , м/с	Ширина русла, B , м	Число Фруда, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	Высота гряды, h_r , м	Скорость перемещения гряды, C_r , м/с	Элементарный расход донных наносов (в рыхлом теле), q_T , м ³ /с/м	Полный расход донных наносов (в плотном теле), Q_T , м ³ /сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
18,7	0,60	0,39	79	0,16	0,06	0,0000321	0,0000012	6
67,1	1,06	0,61	104	0,19	0,11	0,0000767	0,0000049	31
133	1,43	0,75	123	0,20	0,14	0,0001169	0,0000100	75
323	1,79	0,94	192	0,22	0,18	0,0002020	0,0000217	252
1460	2,60	1,37	410	0,27	0,26	0,0005183	0,0000809	2005
2905	4,10	1,73	410	0,27	0,41	0,0006638	0,0001633	4050
3961	5,10	1,89	410	0,27	0,51	0,0006909	0,0002114	5243

На рисунке 5.4 дана кривая зависимости полного расхода донных наносов в $\text{м}^3/\text{сут}$ от расхода воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) для исследуемого участка р. Юг, построенная по данным таблицы 5.3 в диапазоне расходов воды 133-3961 $\text{м}^3/\text{с}$.

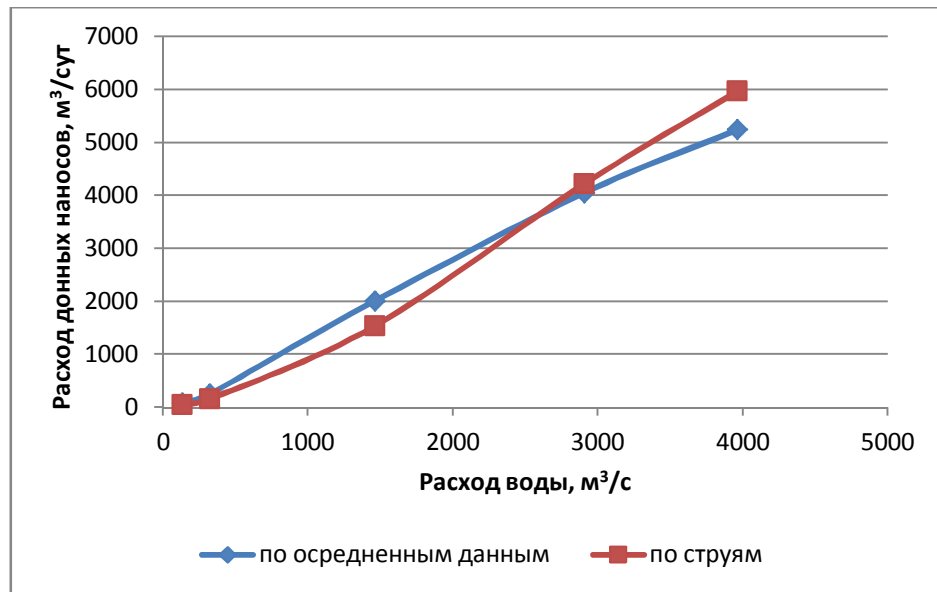


Рисунок 5.4 – Зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды в расчетном поперечном сечении р. Юг

В составе настоящего исследования была получена также зависимость расхода донных наносов Q_T ($\text{м}^3/\text{сут}$) от расхода воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) на исследуемом участке р. Юг по данным измерений и расчетов методом суммирования по отдельным струям (рисунки 5.4 и 5.5). По аналогии с описанными выше вычислениями, полученными по осредненным для расчетного поперечного сечения гидравлическим характеристикам потока, были выполнены расчеты для четырех струй (морфологически однородных сечений русла) по отдельности, а затем произведено суммирование полученных значений для расчета полного расхода донных наносов (таблица 5.4).

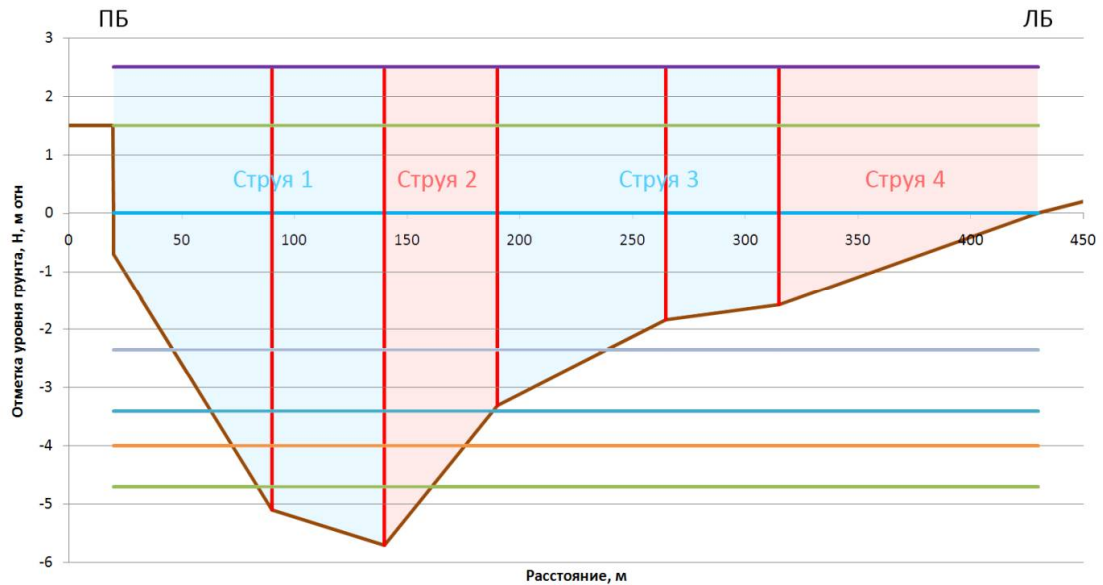


Рисунок 5.5 – Поперечный профиль р. Юг в измерительном створе с разделением на расчетные струи

Таблица 5.4 – Значения расходов донных наносов по струям и в полном потоке

Расход воды, Q , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов в струе 1, q_{T1} , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов в струе 2, q_{T2} , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов в струе 3, q_{T3} , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов в струе 4, q_{T4} , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов потока, Q_T , $\text{м}^3/\text{сут}$
18,7	0	0	0	0	0
67,1	0	0	0	0	0
133	0,00051990	0,00018513	0	0	43
323	0,00196228	0,00064475	0	0	158
1460	0,00997309	0,00258620	0,01203218	0,00075861	1533
2905	0,01690021	0,00498577	0,04522724	0,00262876	4218
3961	0,02046972	0,00633634	0,06798938	0,00386365	5967

Наряду с формулой ГГИ, используемой выше для расчета расхода и стока донных наносов в р. Юг, в литературных источниках, посвященных проблеме оценки этих характеристик, и в соответствующих нормативных документах, включая нормативные руководства ГГИ [20, 79, 80], рекомендуются и другие зависимости [82, 93]. Поэтому было выполнено сравнение результатов расчета расхода донных наносов в р. Юг по методу ГГИ с другими методами, наиболее часто рекомендуемыми в зарубежных и отечественных источниках, в судоходной практике [63] и в гидротехнике [61].

Для этой цели из различных источников было отобрано 14 формул: В.С. Кнороза (1960), Ю.М. Корчохи (1968), В.Ф. Пушкарева (1948), А.Н. Бутакова (1998), К.В. Гришанина (1969), В.Н. Лазарева и Ф.М. Чернышова (1974), И.И. Леви (1957), Э. Мейер-Петера (1934), Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера (1948), К.Б. Брауна (1950), Г.И. Шамова (1952), ВНИИСТА, Р.А. Бэгнольда (1966), В.Н. Графа и Е.Р. Акароглу (1968) (таблицы А.1, А.2, А.4 и А.6).

Три первых формулы из этого списка получены для грядового движения донных наносов и содержат выражения для высоты и скорости движения гряд. Формулы Гришанина, Лазарева и Чернышова, Графа и Акароглу, Бэгнольда, Брауна, Мейер-Петера и Мюллера используются в судоходной практике [63]. Формула Леви рекомендована в нормативном документе для расчетов трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов [61]. В этом же документе рекомендуются также формулы Кнороза, ГГИ и Бэгнольда. Формулы Мейер-Петера, Мейер-Петера и Мюллера и их модификации чрезвычайно популярны в Западной литературе и широко используются в практических расчетах без каких-либо ограничений. В нормативных документах ГГИ наряду с формулой ГГИ рекомендованы формулы Шамова, ВНИИСТА, Бэгнольда, Графа и Акароглу, Брауна, Гришанина.

Расчеты по всем указанным формулам выполнялись по той же схеме двумя методами, как это описано выше, при выполнении расчетов по методу ГГИ: по осредненным по поперечному сечению русла гидравлическим характеристикам потока и методом суммирования расчетов, выполненных по гидравлическим характеристикам выделенных в потоке струй, для полного потока.

По каждой из четырнадцати проверяемых формул, так же как по методу ГГИ (рисунок 5.4), в диапазоне расходов воды 133-3961 м³/с были построены зависимости вида $Q_T = f(Q)$, полученные в результате расчетов по осредненным для поперечного профиля русла гидравлическим характеристикам потока и расчетом по отдельным струям потока с последующим суммированием полученных значений для поперечного сечения потока. По ряду формул, основанных на критерии Шильдса и функции Эйнштейна, а также использующих поправки на неоднородность грунта, расчеты выполнены в нескольких вариантах. Результаты расчетов представлены в виде графиков зависимостей $Q_T = f(Q)$ на рисунках 5.6-5.8. На рисунке 5.6 приводятся результаты по всем формулам. На рисунке 5.7 убраны формулы с наиболее сильно отличающимися от других результатами. На рисунке 5.8 приводятся результаты по формулам, результаты расчетов по которым наиболее близки к полученным по методу ГГИ, описанному выше.

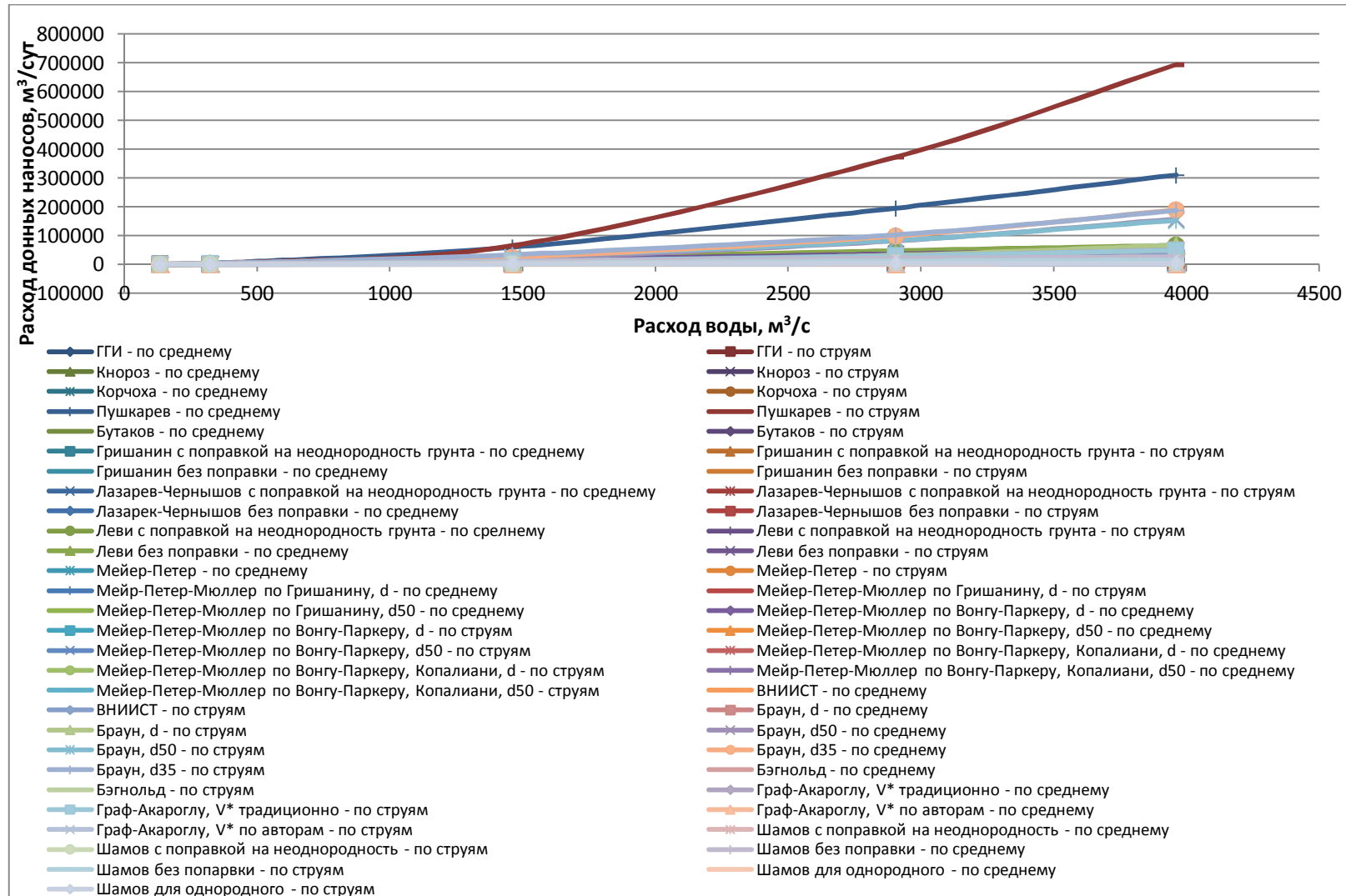


Рисунок 5.6 – Зависимости расхода донных наносов от расхода воды, полученные по формулам, рекомендуемым различными руководящими документами (см. таблицы А.1, А.2, А.4, А.6)

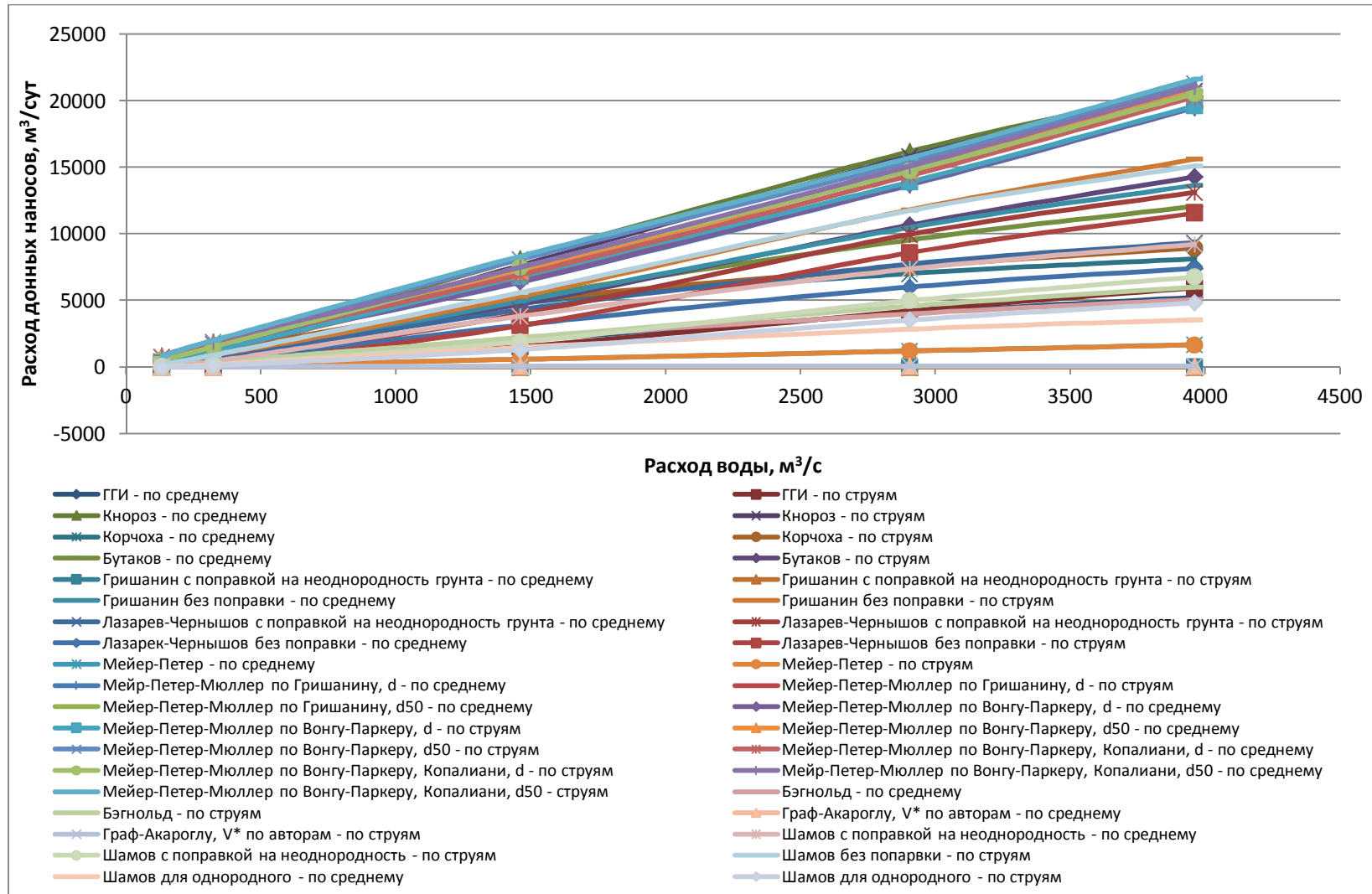


Рисунок 5.7 – Зависимости расхода донных наносов от расхода воды, полученные по формулам, рекомендуемым различными руководящими документами (без наиболее сильно отличающихся от основной массы)

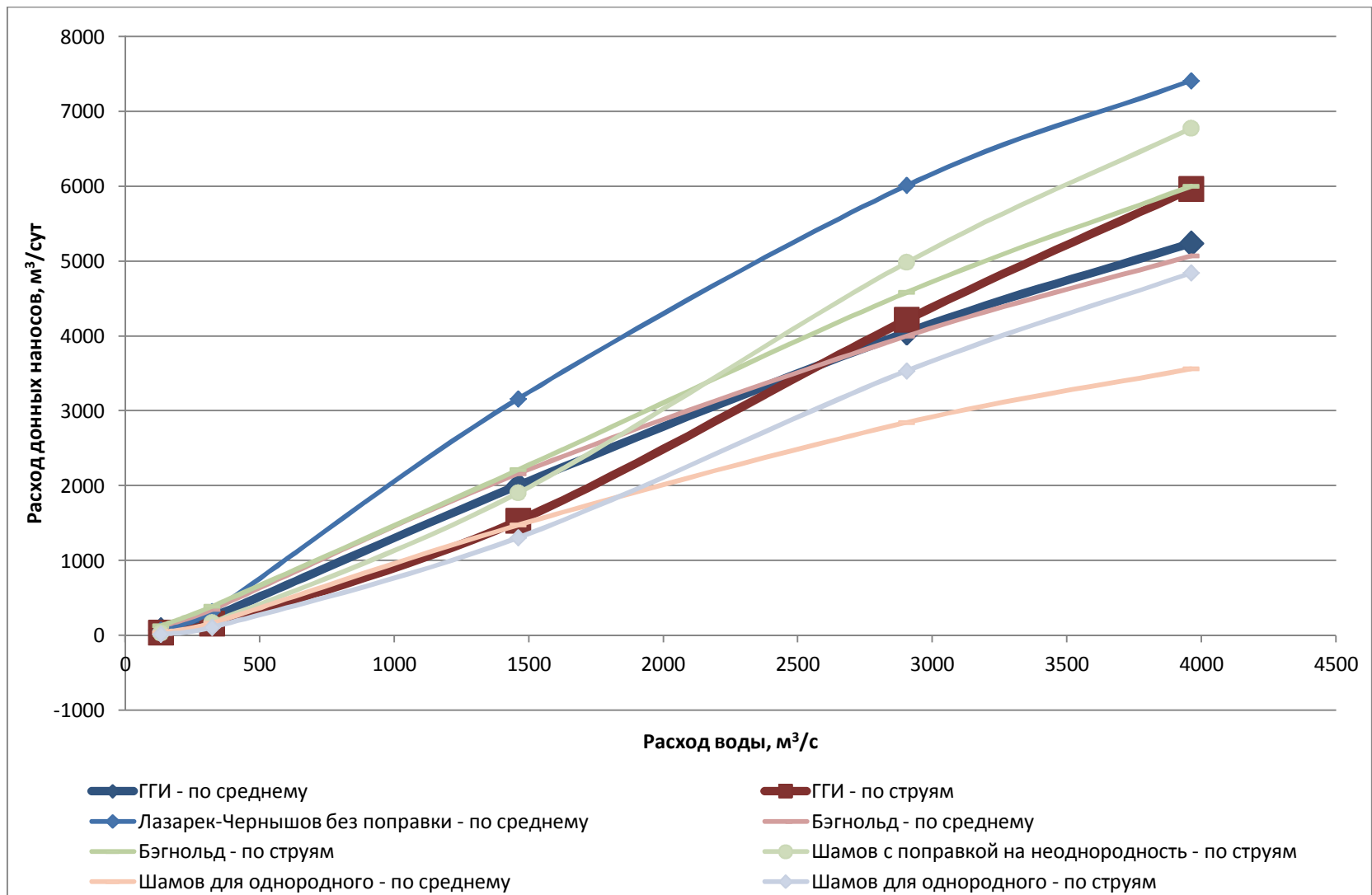


Рисунок 5.8 – Зависимости расхода донных наносов от расхода воды, наиболее близкие к полученным по методу ГГИ

Из рисунка 5.8 следует, что наиболее близкие результаты к полученным по методу ГГИ дали формулы Бэгнольда, Шамова и Лазарева и Чернышова. Самый близкий результат получен по формуле Бэгнольда. Ниже приведены аналитические выражения этих формул (полную запись формул см. в таблицах А.4 и А.6):

- Р.А. Бэгнольд (1966) [20]

$$q_T = \frac{\rho}{\rho_T - \rho} \frac{V^3}{C_d^2} \frac{e'}{\operatorname{tg} \varphi} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}, C_d = \sqrt{g} \left(5,66 \lg \frac{H}{\Delta} + 6 \right).$$

Эмпирический параметр e' определяется по таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Значения параметра e' [20]

d , мм	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0
e'	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12

- Г.И. Шамов (1952) [82]

$$q_T = 0,95 \sqrt{d} \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H} \right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м} - \text{ для однородных грунтов,}$$

$$q_T = \alpha \sqrt{d_{max}^2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H} \right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м} - \text{ для смешанного состава наносов, } V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}.$$

- В.Н. Лазарев, Ф.М. Чернышов (1974) [51]

$$q_T = 0,1 \left(\frac{d}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{d}{w} \sqrt{\frac{V - V_0}{w}} (V - V_0)^2 \frac{q}{H \sqrt{gH}} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}, V_0 = 3,83 d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}.$$

Из выполненных по разным методам расчетов и сравнительного анализа полученных результатов следует, что для расчета расхода донных наносов в равнинных реках с грядовым движением песчано-гравелистых донных отложений наряду с формулой ГГИ могут быть использованы зависимости Бэгнольда, Шамова и Лазарева и Чернышова.

5.2 Расчеты расхода донных наносов в рр. Тосне, Луге и Шелони

Для получения локальной зависимости расхода донных наносов от расхода воды в р. Тосне (Тосно) были использованы следующие данные: максимальные расходы воды, данные таблиц измеренных расходов воды и данные по гранулометрическому составу донных отложений в рассматриваемом створе.

Для данного створа сначала был построен хронологический график максимальных расходов воды за весь период измерений (рисунок 5.9). Для выявления характерных по водности лет на полученный график был нанесен средний максимальный расход воды,

вычисленный как среднее арифметическое из имеющихся для данного створа максимальных расходов.

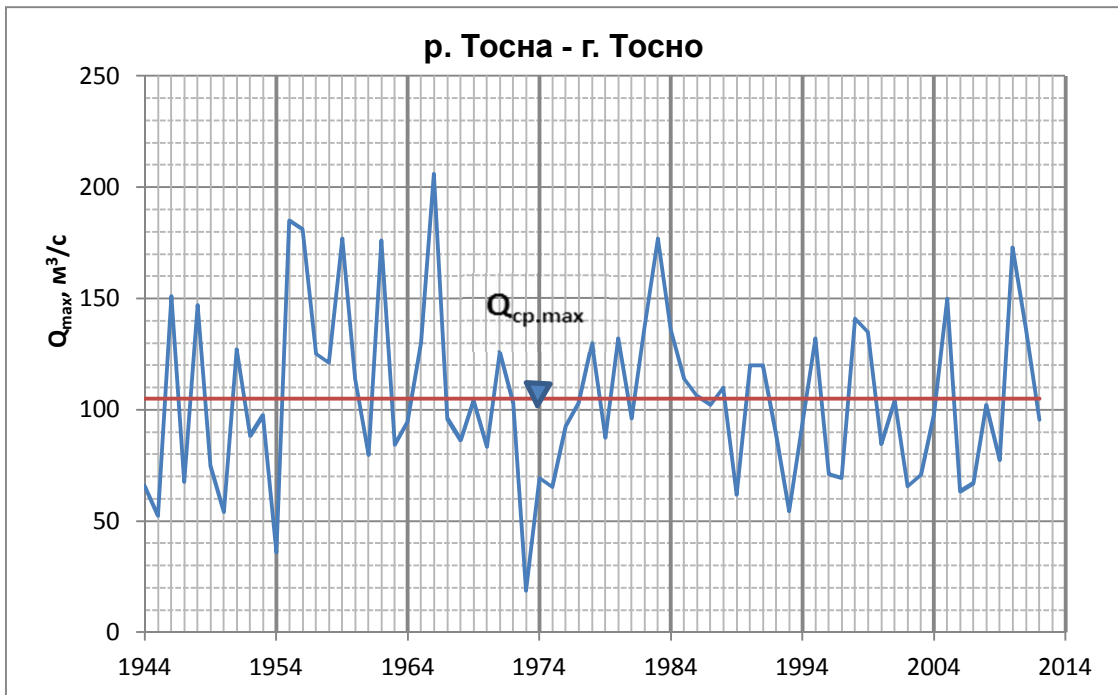


Рисунок 5.9 – Изменения максимальных расходов воды р. Тосны у г. Тосно за весь период наблюдений

Так как данные об измеренных расходах воды публиковались в гидрологических ежегодниках только в период с 1959 по 1974 гг., то для расчетов можно было использовать данные только этого периода. В качестве рабочих были взяты годы с наибольшими максимальными расходами и наиболее полной информацией об измеренных расходах воды: 1960, 1962, 1966, 1971, 1974.

По данным таблиц измеренных расходов воды были построены графики связи расходов воды Q с уровнем воды Z (рисунок 5.10), шириной водной поверхности B (рисунок 5.11), средней H (рисунок 5.12) и максимальной H_{\max} (рисунок 5.13) глубинами и средней V (рисунок 5.14) и максимальной V_{\max} (рисунок 5.15) скоростями воды. Графики показали наличие устойчивых связей между рассматриваемыми гидравлическими характеристиками.

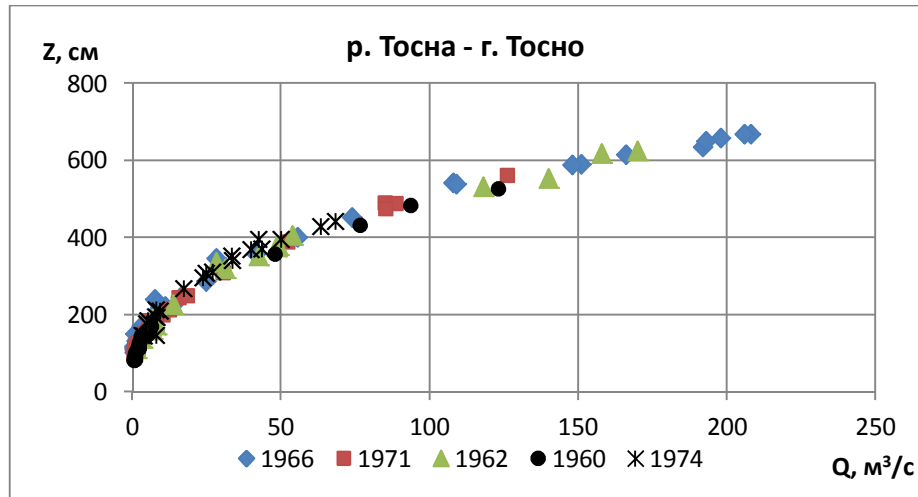


Рисунок 5.10 – Зависимость уровня от расхода воды р. Тосны в створе гидрометрических измерений г. Тосно

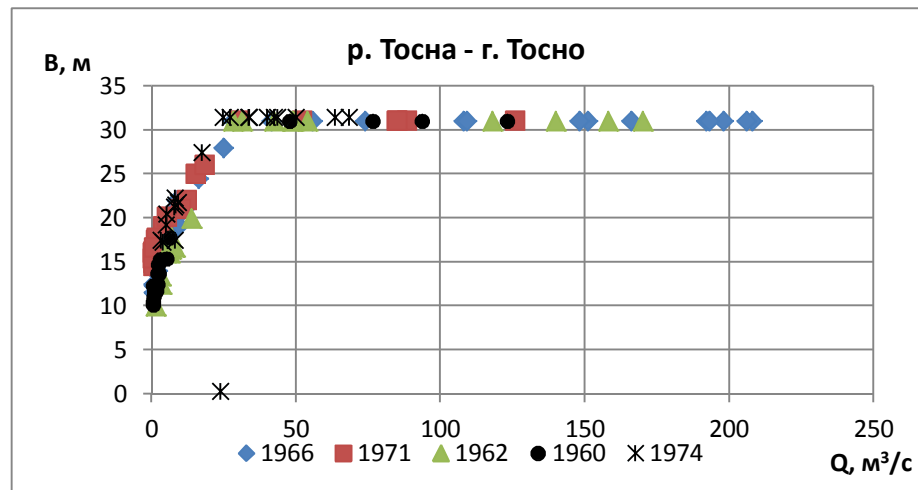


Рисунок 5.11 – Зависимость ширины потока от расхода воды р. Тосны в створе гидрометрических измерений г. Тосно

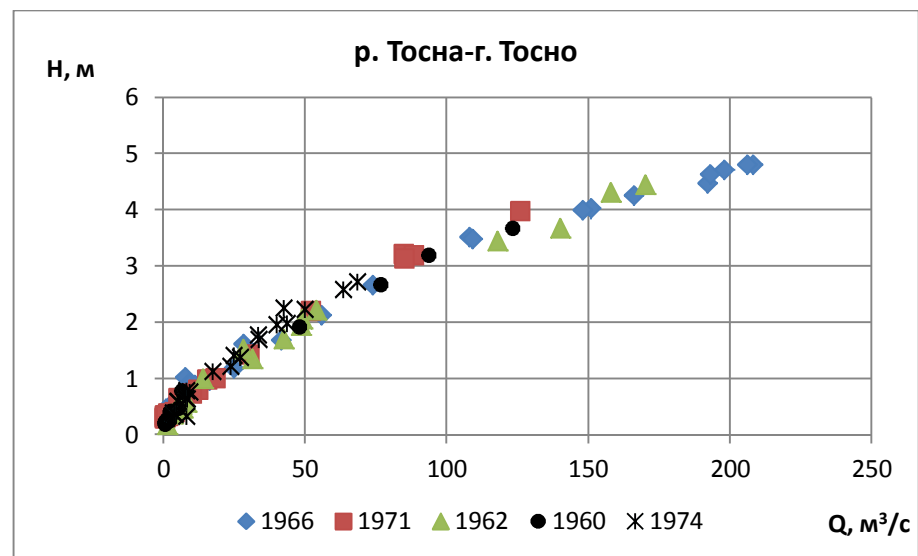


Рисунок 5.12 – Зависимость средней глубины потока от расхода воды р.Тосны в створе гидрометрических измерений г.Тосно

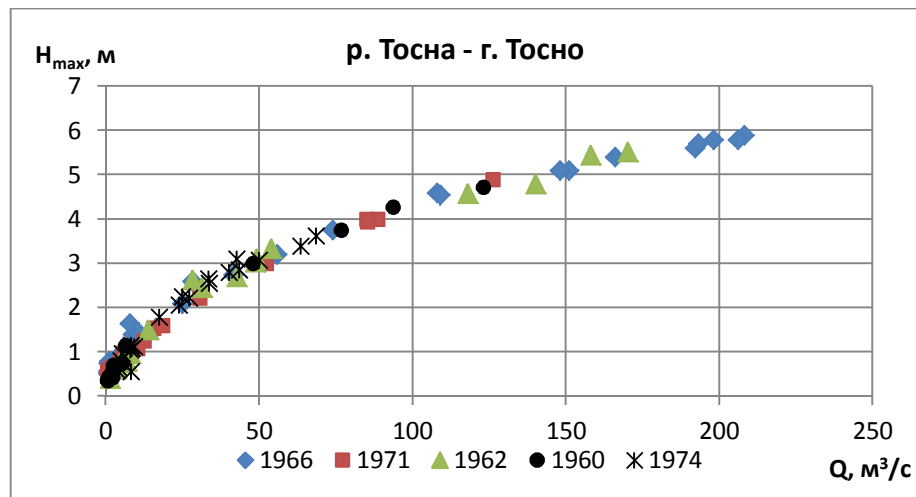


Рисунок 5.13 – Зависимость максимальной глубины потока от расхода воды р.Тосны в створе гидрометрических измерений г.Тосно

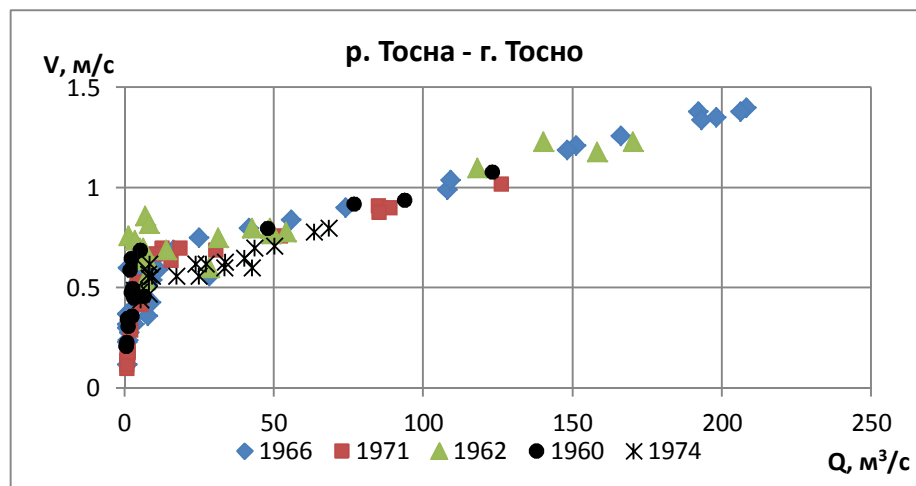


Рисунок 5.14 – Зависимость средней скорости течения потока от расхода воды р. Тосны в створе гидрометрических измерений г. Тосно

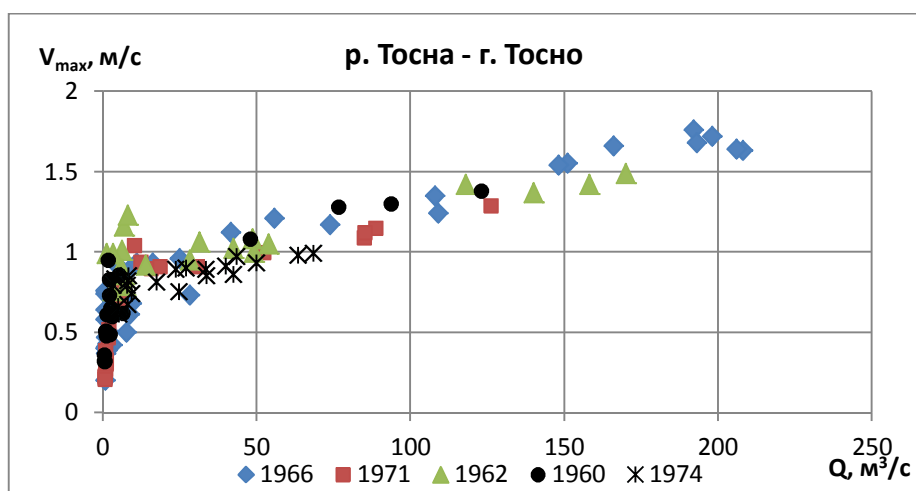


Рисунок 5.15 – Зависимость максимальной скорости течения потока от расхода воды р. Тосны в створе гидрометрических измерений г. Тосно

По данным полевых исследований в створе г. Тосно были построены дифференциальная (рисунок 5.16) и интегральная (рисунок 5.17) кривые гранулометрического состава донных отложений и определены основные характеристики грансостава (таблица 5.6).

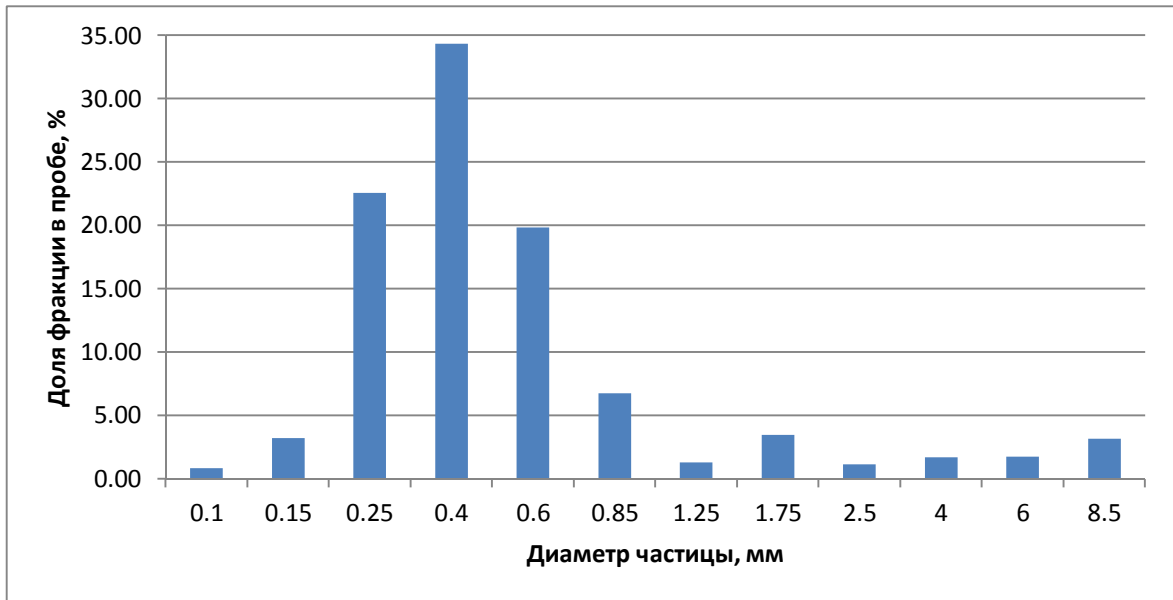


Рисунок 5.16 – Дифференциальная кривая гранулометрического состава донных отложений р. Тосны в створе г. Тосно по данным полевых измерений

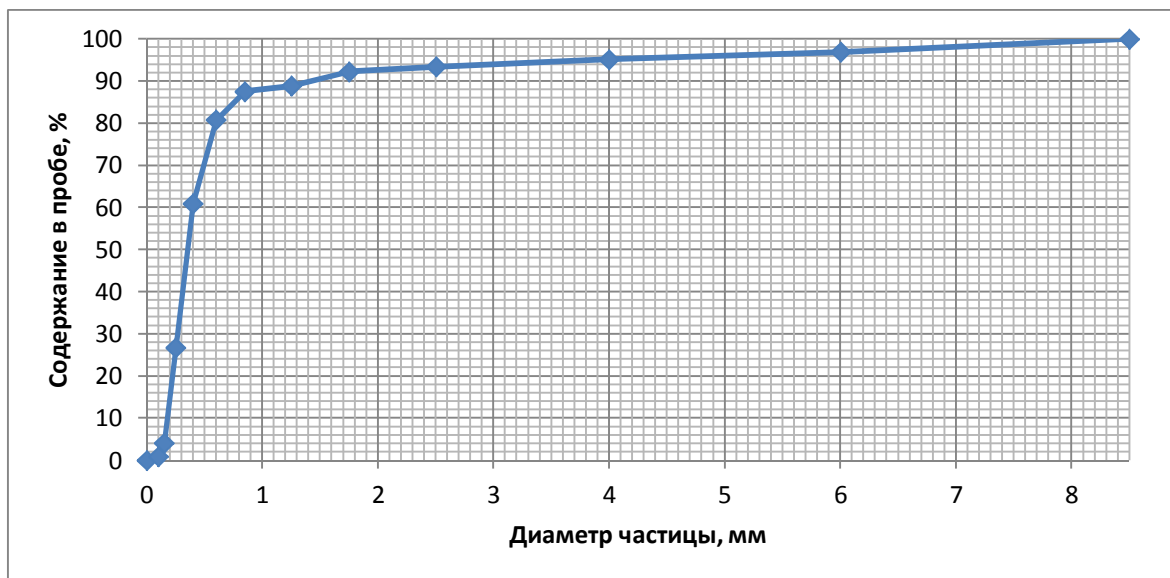


Рисунок 5.17 – Интегральная кривая гранулометрического состава донных отложений р. Тосны в створе г. Тосно по данным полевых измерений

Таблица 5.6 – Основные характеристики и параметры гранулометрического состава донных отложений р. Тосны в створе г. Тосно по данным полевых измерений

Характеристика / параметр	Значение
d , мм	0,92

Характеристика / параметр	Значение
d_{50} , мм	0,35
d_{10} , мм	0,18
d_{90} , мм	1,45
$\frac{d_{90}}{d_{10}}$	8,06

Для расчетов расхода донных наносов по графикам рисунков 5.10-5.15 был выбран год с наибольшей водностью (1966). Для данного года были вычислены расходы донных наносов для 5 значений расхода воды во всем диапазоне Q .

Расход донных наносов вычислялся двумя способами (см. таблицу 5.7):

- по формуле ГГИ, полученной комбинацией $q_{\Gamma} = 0,6h_{\Gamma}C_{\Gamma}$ м³/с/м формулы для высоты гряд А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани (2006) $h_{\Gamma} = 0,13h$ м и формулы Б.Ф. Снисенко и З.Д. Копалиани (1978) $C_{\Gamma} = 0,019VFr^3$ м/с;
- по методу Г.И. Шамова (см. таблицу А.4).

Таблица 5.7 – Результаты расчетов расхода донных наносов р. Тосны в створе г. Тосно по формулам ГГИ и Г.И. Шамова

ГГИ										
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$B, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	Fr	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$q_T, \text{ м}^3/\text{с/м}$	$Q_T, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_T, \text{ м}^3/\text{сут}$
25	28	1,3	0,00092	0,75	0,21	0,17	0,00013	0,00001	0,00026	22,7
50	31	2,1	0,00092	0,8	0,18	0,27	0,00008	0,00001	0,00030	25,6
100	31	3,25	0,00092	1	0,18	0,42	0,00011	0,00002	0,00058	50,2
150	31	4	0,00092	1,2	0,19	0,52	0,00016	0,00004	0,00109	93,8
200	31	4,7	0,00092	1,35	0,20	0,61	0,00020	0,00005	0,00160	138,5
Г.И. Шамов										
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$B, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$\overline{d_{max}}, \text{ м}$	$V_0, \text{ м/с}$	α	$q_T, \text{ м}^3/\text{с/м}$	$Q_T, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_T, \text{ м}^3/\text{сут}$
25	28	1,3	0,00092	0,75	0,00455	0,389151	1,50	0,00001	0,00018	15,8
50	31	2,1	0,00092	0,8	0,00455	0,421533	1,50	0,00001	0,00018	15,6
100	31	3,25	0,00092	1	0,00455	0,453359	1,50	0,00001	0,00037	31,7
150	31	4	0,00092	1,2	0,00455	0,469323	1,50	0,00002	0,00072	62,6
200	31	4,7	0,00092	1,35	0,00455	0,482108	1,50	0,00004	0,00109	93,8

После вычисления расхода донных наносов были построены графики связи $Q_T(Q)$, где Q_T брался в $\text{м}^3/\text{сут}$, а Q – в $\text{м}^3/\text{с}$ (рисунок 5.18).

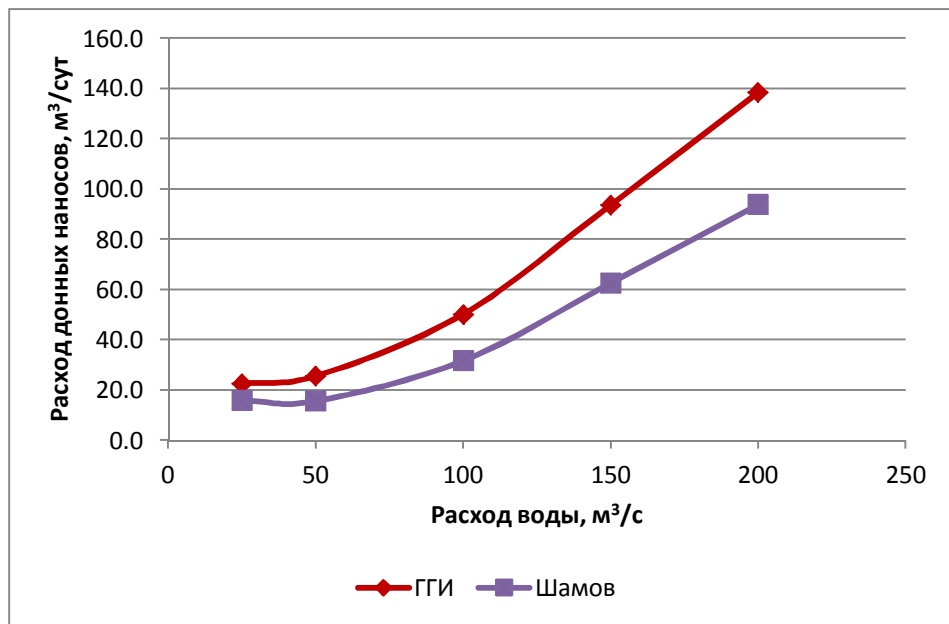


Рисунок 5.18 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методам ГГИ и Г.И. Шамова, от расхода воды для р. Тосны в створе г. Тосно

Полученные локальные зависимости действительны в диапазоне расходов воды 25-200 $\text{м}^3/\text{с}$. Ввиду специфической интерполяции, заложенной в программе Microsoft Excel, полученную связь удобнее представить в табличной форме (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методам ГГИ и Г.И. Шамова, от расхода воды для р. Тосны в створе г. Тосно

Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	Расход донных наносов, $\text{м}^3/\text{сут}$	
	ГГИ	Г.И. Шамова
25	22,7	15,8
50	25,6	15,6
100	50,2	31,7
150	93,8	62,6
200	138,5	93,8

Аналогично описанному выше, на основе данных гидрологических ежегодников по измеренным расходам воды и полевым данным по гранулометрическому составу донных отложений по формуле ГГИ были получены локальные зависимости и для других рек Северо-Запада Европейской территории России:

- р. Луга (г. Луга) в диапазоне расходов воды 25-100 $\text{м}^3/\text{с}$ (таблица 5.9);

- р. Луга (ст. Толмачево) в диапазоне расходов воды 20-100 м³/с (таблица 5.10);
- р. Луга (г. Кингисепп) в диапазоне расходов воды 40-200 м³/с (таблица 5.11);
- р. Шелонь (г. Порхов) в диапазоне расходов воды 50-250 м³/с (таблица 5.12);
- р. Шелонь (ст. Заполье) в диапазоне расходов воды 100-800 м³/с (таблица 5.13).

Таблица 5.9 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методу ГГИ, от расхода воды для р. Луги в створе г. Луга

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
25	1,0
50	3,8
75	8,5
100	13,1

Таблица 5.10 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методу ГГИ, от расхода воды для р. Луги в створе ст. Толмачево

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
20	2,2
40	6,0
50	9,0
60	10,9
80	17,1
100	21,0

Таблица 5.11 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методу ГГИ, от расхода воды для р. Луги в створе г. Кингисепп

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
40	6,1
50	9,1
80	41,4
100	72,4
120	95,9
150	147

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
160	157
200	166

Таблица 5.12 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методу ГГИ, от расхода воды для р. Шелони в створе г. Порхов

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
50	14,4
100	59,4
200	139,7
250	147,1

Таблица 5.13 – Зависимость расхода донных наносов, вычисленного по методу ГГИ, от расхода воды для р. Шелони в створе г. Заполье

Расход воды, м ³ /с	Расход донных наносов, м ³ /сут
100	48,2
200	165
300	319
400	519
500	671
600	845
700	970
800	1189

Заключение

Целью работы была поставлена научно обоснованная оптимизация методов расчета расхода донных наносов на основе учета гидравлических особенностей водотоков. Развиваемый в диссертации дифференцированный подход к расчетам расхода донных наносов учитывает специфику условий транспорта донных наносов в равнинных реках разного размера и горно-предгорных реках: наличие грядовой и безгрядовой форм движения донных наносов, различных гидрологических и гидравлических режимов рек и состава руслового материала.

В соответствии с целью и задачами работы, во-первых, выполнен анализ существующих методов измерения расхода донных наносов в полевых и лабораторных условиях и выбраны наиболее надежные данные измерений.

Во-вторых, в рамках собранных достоверных данных измерений разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов. Под словом «реки» в контексте исследования понимается сочетание определенных гидравлических условий. Равнинные реки поделены по числу Фруда с учетом глубины, уклона и крупности донных отложений на две категории: крупные равнинные реки с $Fr < 0,2$ и равнинные реки с $0,2 \leq Fr \leq 0,5$. Горно-предгорные реки разделены по форме транспорта донных наносов: с грядовой формой движения донных наносов, которая имеет место в узких гидравлических условиях, и горно-предгорные реки с бесструктурным транспортом донных наносов.

Из классифицированных таким образом данных измерений составлены и зарегистрированы три электронные базы данных (копии свидетельств о регистрации приведены в приложении Г):

- «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (200 измерений расхода донных наносов) – свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992 (рисунок Г.1 приложения),
- «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (220 измерений) – свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878 (рисунок Г.2),
- «Данные измерений гидравлических характеристик бесструктурного транспорта донных наносов в лабораторных экспериментах в гидравлических лотках» (24

измерения) – свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620958 (рисунок Г.3).

В-третьих, произведены анализ и систематизация существующих методов расчета расхода донных наносов, и создан их электронный архив, включающий 17 формул для расчета высоты донных гряд, 32 формулы для скорости их перемещения, 84 формулы для расчета расхода донных наносов, не учитывающих в явном виде характеристики донных гряд, и локальные и региональные формулы 22 авторов. Формулы для высоты гряд (включая две, полученные автором), 15 расчетных формулы для скорости гряд и 84 формулы для расхода донных наносов, не учитывающих характеристики гряд в явном виде, были зарегистрированы в виде двух баз данных:

- «Формулы расчета расхода донных наносов, учитывающие в явном виде характеристики донных гряд» (36 формул) – свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621415 (рисунок Г.4 приложения),
- «Формулы расчета расхода донных наносов, не учитывающие в явном виде характеристики донных гряд» (84 формулы) - свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621406 (рисунок Г.5).

В-четвертых, на базе собранных достоверных данных измерений выполнена апробация расчетных методик применительно к равнинным рекам двух категорий и горно-предгорным рекам с грядовым и бесструктурным транспортом донных наносов. В ходе апробации произведено около 60000 тестовых расчетов расхода донных наносов и характеристик донных гряд с целью проверки и сравнения формул. В результате апробации в соответствии с указанной гидравлической классификацией, основанной на дифференцированном подходе, дано научное обоснование рекомендуемых методов расчета расхода донных наносов.

Наконец, по итогам апробации разработаны научно обоснованные рекомендации по расчету расхода донных наносов отдельно для каждой из четырех выделенных групп рек.

Основные выводы выполненного исследования:

1. Впервые предложена и на основании наиболее достоверных на сегодня данных измерений разработана гидравлическая классификация рек применительно к задаче расчета расхода донных наносов. Равнинные реки разделены по числу Фруда с учетом глубины, уклона и крупности донных отложений на две категории: с $Fr < 0,2$ – крупные реки и с $0,2 \leq Fr \leq 0,5$. Горно-предгорные реки разделены по форме транспорта донных наносов: с грядовой и с бесструктурной формой.

2. Впервые в результате апробации большого числа методов на базе обширных достоверных данных, разработаны рекомендации по расчету расхода донных наносов отдельно для каждой из выделенных групп рек.
3. Получены новые эмпирические формулы: для расчета высоты гряд в крупных равнинных реках с числом Фруда $Fr < 0,2$ $h_r = 0,11H$ (3.1), расчета высоты гряд $h_r = 0,22H$ (4.4) и расхода донных наносов $q_T = 0,0025HVFr^3$ (4.5) в горно-предгорных реках.
4. Уточнена технология расчета расхода донных наносов в следующих аспектах:
 1. установлена непригодность методов, основанных на наиболее распространенном за рубежом подходе критического касательного напряжения, для равнинных рек, ввиду того, что фактические касательные напряжения на 1-2 порядка превышают критические;
 2. выявлено, что в условиях грядового движения донных наносов, как в равнинных, так и в горно-предгорных реках, большую эффективность, чем прочие подходы, показывают методы, учитывающие в явном виде характеристики гряд;
 3. установлено, что в случаях неоднородного состава донных отложений в горно-предгорных реках выбор характеристики гранулометрического состава (d , d_{50} или др.) в формулах, основанных на использовании критерия Шильдса и функции Эйнштейна, существенным образом влияет на результаты расчета;
 4. установлена бóльшая достоверность значения критического безразмерного касательного напряжения, предлагаемого З.Д. Копалиани ($\theta_0 = 0,03$), по сравнению с традиционно применяемым в инженерных расчетах значением этого параметра по А. Шильдсу ($\theta_0 = 0,06$);
 5. выявлены формулы, для которых введение поправок на неоднородность грунта типа $\left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2}$ существенного влияния на результат расчета не оказывает.
5. С использованием рекомендуемых в работе формул получены локальные зависимости расхода донных наносов для 7 створов рек Севера и Северо-Запада на основе минимальной гидравлической информации.

Перечисленные выводы, по существу, являются научно обоснованной оптимизацией методов расчета расхода донных наносов, и, таким образом, цель, поставленную в начале исследования, можно считать достигнутой.

С точки зрения автора, дальнейшее развитие и совершенствование методов расчета расхода донных наносов преимущественно зависит от степени достоверности и

гидравлического разнообразия данных измерений. Получение таких данных является приоритетной задачей на ближайшие годы.

Список основных условных обозначений

H – средняя глубина потока,

V – средняя скорость потока,

B – ширина потока,

q – расход воды на единицу ширины русла,

Q – полный расход воды,

I – уклон водной поверхности,

C – коэффициент Шези,

g – ускорение свободного падения,

$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда,

d – средняя крупность руслового материала,

d_{50} – медианный диаметр донных отложений,

w – гидравлическая крупность,

h_r – высота гряды,

C_r – скорость перемещения гряды,

l_r – длина гряды,

q_T – расход донных наносов на единицу ширины русла,

Q_T – полный расход донных наносов,

λ – гидравлический коэффициент трения,

ν – кинематический коэффициент вязкости,

ρ – плотность воды,

ρ_T – плотность донных частиц,

γ – удельный вес воды,

γ_T – удельный вес донных частиц,

$\tau = \gamma H I$ – касательное напряжение,

$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_T - \gamma)d}$ – безразмерное касательное напряжение, коэффициент подвижности руслового материала (коэффициент Шильдса),

$\psi = \frac{1}{\theta}$ – коэффициент устойчивости,

$Re = \frac{VH}{\nu}$ – число Рейнольдса,

$V_* = \sqrt{gHI}$ – динамическая скорость потока,

$Re_{*d} = \frac{V_* d}{\nu}$ – число Рейнольдса по динамической скорости,

V_0 – неразрывающаяся скорость потока,

q_0 – критический расход воды, при котором начинается движение донных отложений,

I_0 – критический уклон водной поверхности, при котором начинается движение донных отложений,

θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение, при котором начинается движение донных отложений,

$\Phi = q_{\tau} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_{\tau} - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ – функция Эйнштейна (безразмерный расход донных наносов).

Список литературы

1. Архив Отдела русловых процессов Государственного гидрологического института.
2. Барекян А.Ш. Размывающие и неразмывающие скорости течения воды для несвязных грунтов // Научно-техническая информация по мелиорации и гидротехнике. – ВНИИГиМа. – 1961. – Вып. 11. – С. 17-20.
3. Барекян А.Ш. Расход влекомых наносов и устойчивость русел рек // Тр. ВНИИГиМ. – 1960. – Т. 35. – С. 85-99.
4. Барекян А.Ш. Расход руслоформирующих наносов и элементы песчаных волн // Метеорология и гидрология. – 1962. – № 8. – С. 33-35.
5. Башков А.С., Копалиани З.Д., Сنيщенко Б.Ф. Проблемы руслового процесса малых рек // Современное состояние малых рек СССР и пути их использования, сохранения и восстановления. – Докл. Секции русловых процессов, водных ресурсов и водного баланса ГКНТ СССР. – Вып. 2. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – С. 127-141.
6. Боголюбова И.В. Результаты полевых исследований и расчет стока влекомых наносов р. Мзымты // Тр. ГГИ. – 1968. – Вып. 156. – С. 39-63.
7. Бутаков А.Н. Обоснование расчетной формулы для расхода русловых наносов методом сравнительного анализа // Тр. Академии водохозяйственных наук. – 1998. – Вып. 5. – Гидрология и русловые процессы. – С. 225-238.
8. Вафин Р.Г. Донные наносы селевых потоков // Тр. САНИИРИ. – 1970. – Вып. 124. – С. 223-227.
9. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т. 2. – М.: Гостехиздат. – 1955. – 323 с.
10. Гвелесиани А.Г., Шмальцель Н.П. Заиление водохранилищ гидроэлектростанций. – М.: Энергия. – 1968. – 84 с.
11. Гончаров В.Н. Движение наносов. – ОНТИ. – 1938. – 308 с.
12. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1962. – 274 с.
13. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат. – 1969. – 428 с.
14. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. – М.: Транспорт. – 1990. – 320 с.
15. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. – М.: Транспорт. – 1972. – 216 с.
16. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 143 с.
17. Дебольский В.К. К исследованию размывающих скоростей руслового потока // Тр. МИИТ. – 1968. – Вып. 319. – С. 78-87.

18. Дебольский В.К., Коган Л.Д., Михайлова Н.А. Критические скорости потока и критерии форм транспорта наносов // Водные ресурсы. – 1976. – № 4. – С. 154-160.
19. Джаошвили Ш.В. Речные наносы и пляжеобразование на Черноморском побережье Грузии. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело. – 1986. – 155 с.
20. Добыча нерудных строительных материалов в водных потоках. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров: СТО ФГБУ «ГГИ». 52.08.31-2012. – СПб. – 2012. – 131 с.
21. Доу Го-жень. Перемещение наносов и устойчивость дна водных потоков: автореф. дисс. докт. техн. наук. – Л. – 1960. – 38 с.
22. Егиазаров И.В. Сопоставление методов расчета расхода наносов с измерениями в природе. – В кн.: Методы изучения и использования водных ресурсов. – М.: Наука. – 1964. – С. 5-23.
23. Железняков Г.В., Дебольский В.К. О грядовом движении наносов при их различной плотности // Докл. ВАСХНИЛ. – 1971. – № 2. – С. 42-45.
24. Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. – СПб: Гидрометеиздат. – 1992. – 240 с.
25. Знаменская Н.С. Грядовое движение наносов. Теория и практические приложения. – Л.: Гидрометеиздат. – 1968. – 186 с.
26. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. – Л.: Гидрометеиздат. – 1976. – 91 с.
27. Знаменская Н.С. Экспериментальное исследование грядового движения наносов // Тр. ГГИ. – 1963. – Вып. 108. – С. 89-114.
28. Капитонов Н.М., Караушев А.В., Разумихина К.В. Изучение движения наносов в нижних бьефах ГЭС // Тр. ГГИ. – 1974. – Вып. 120. – С. 98-112.
29. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. – Л.: Гидрометеиздат. – 1975. – 288 с.
30. Караушев А.В. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. – Л.: Гидрометеиздат. – 1977. – 240 с.
31. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1977. – 271 с.
32. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. О связи длины гряд с продольным размером крупномасштабных элементов турбулентности // Тр. ГГИ. – 1974. – Вып. 219. – С. 19-24.

33. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб: Нестор-История. – 2011. – 543 с.
34. Кнороз В.С. О деформациях дна и о влиянии их на гидравлический режим потоков // Тр. III Всесоюзного гидрологического съезда. – 1960. – Т. V. – С. 166-176.
35. Коган Л.Д., Углов В.П. Формы транспорта и расход наносов. – Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. – М.: Наука. – 1985. – С. 131-137.
36. Копалиани З.Д. Лабораторные исследования грядового движения крупных наносов // Тр. ГГИ. – 1972. – Вып. 204. – С. 61-74.
37. Копалиани З.Д. Расчеты предельных скоростей для сдвига донных частиц в водных потоках // Тезисы VII Всероссийского гидрологического съезда. – 2013.
38. Копалиани З.Д. Расчеты расхода донных наносов при их структурном транспорте в реках горно-предгорной зоны // Тр. III международной научно-технической конференции «Современные проблемы охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». – Тбилиси-Боржоми, Грузия. – 2013. – С. 117-125.
39. Копалиани З.Д., Бородулина А.И., Першин С.К. Лабораторные исследования кинематики потока и русловых деформаций в бытовых и проектных условиях на участке прижима реки Ньюжи по трассе БАМ // Тр. ГГИ. – 1980. – Вып. 275. – С. 105-126.
40. Копалиани З.Д., Гендельман М.М. Русловой процесс и гидравлические сопротивления. В кн.: Проблемы современной гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат. – 1989. – С. 288-304.
41. Копалиани З.Д., Жук М.М. К проблеме оценки стока руслового материала в реках // Журнал Университета водных коммуникаций. – 2010. – Вып.2. – С. 74-89.
42. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках // Сборник работ по гидрологии. – 2004. – № 27. – С. 25-40.
43. Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.И. Гидравлическое моделирование руслового процесса предгорного участка р. Аносовки на мостовом переходе // Проблемы гидравлики и руслового процесса горных рек. – Докл. Секции русловых процессов Научного совета по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» ГКНТ. – 1992. – Вып. 3. – С. 88-106.
44. Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.И. Гидравлическое моделирование руслового процесса р. Утулик на участке мостовых переходов // Тр. ГГИ. – 1990. – Вып. 337. – С. 138-162.

45. Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.И. Методика и результаты исследований русловых деформаций на неискаженной модели р. Хара-Мурын // Тр. ГГИ. – 1985. – Вып. 301. – С. 68-80.
46. Корчоха Ю.М. Исследование грядового движения наносов на р. Поломети // Тр. ГГИ. – 1968. – Вып. 161. – С. 98-119.
47. Костюченко А.А., Копалиани З.Д. Особенности процесса и стока донных наносов малых рек // Докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. – Секция 6. – Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. – 2006. – С. 44-49.
48. Кромер Р.К. Режим твердого стока рек юга Казахстана // Водные ресурсы. – 1985. – № 6. – С. 105-110.
49. Крошкин А.Н. Исследование гидроморфометрии аллювиальных русел горных рек и аспекты ее инженерного использования в водохозяйственных целях. – Фрунзе. – 1983. – 136 с. – Не издано.
50. Кудряшов А.Ф. Опыт исследования закономерностей русловых процессов на размываемых моделях: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Л. – 1958. – 14 с.
51. Лазарев В.Н., Чернышов Ф.М. Уточнение расчета расхода влекомых наносов для крупнозернистых грунтов // Тр. НИИВТ. – 1974. – Вып. 88: Методы улучшения судоходных условий на реках Сибири. – С. 43-53.
52. Лелявский С.И. Введение в речную гидравлику. – Л.: Гидрометеиздат. – 1961. – 246 с.
53. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР. – М.: Географгиз. – 1952. – 366 с.
54. Морозов В.Н., Ковалев В.А. О величине стока влекомых наносов в устье Дуная // Тр. VI конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» (Москва, 2004). – 2004. – С. 558-559.
55. Носелидзе Д.В. Лабораторные исследования структурного транспорта наносов и регулирования руслового процесса на мостовых переходах предгорных рек: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Тбилиси. – 1992. – 23 с.
56. Повало-Швейковский Н.Т. К вопросу о происхождении дюн // Известия АН СССР. – Серия географическая и геофизическая. – 1938. – № 2-3. – С. 181-214.
57. Поздняков Ш.Р. Методы измерений и расчетов транспорта наносов в реках: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Л. – 1987. – 23 с.
58. Поздняков Ш.Р. Наносы в реках, озерах и водохранилищах в расширенном диапазоне размера частиц: дисс. докт. геогр. наук. – СПб: 2011. – 399 с.
59. Пушкарев В.Ф. Движение влекомых наносов // Тр. ГГИ. – 1948. – Вып. 8 (62). – С. 93-109.

60. Резников П.Н., Чалов Р.С. Сток наносов и условия формирования русел рек бассейна Северной Двины // Геоморфология. – 2005. – № 2. – С. 72-85.
61. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов: СО 34.21204-2005. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – СПб. – 2006. – 101 с.
62. Рекомендации по расчету трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов: П 95-81/ВНИИГ. – Л. – 1981. – 96 с.
63. Рекомендации по улучшению судоходных условий на свободных реках. – СПб: ЛИИВТ. – 1992. – 312 с.
64. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. – Гидрометеиздат. – 1972. – 662 с.
65. Розовский И.Л., Базилевич В.А., Еременко Е.В. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. – Киев: Наукова думка. – 1967. – 274 с.
66. Романовский В.В., Капитонов Н.М. Методика и погрешности измерения расхода влекомых наносов по параметрам гряд // Тр. ГГИ. – 1982. – Вып. 283. – С. 93-108.
67. Ромашин В.В. Морфодинамика речных русел Сочинского района Черноморского побережья Кавказа // Тр. ЦНИИС. – 2002. – Вып. 211. – 167 с.
68. Рустамов С.Г., Ахундов С.А. Исследование стока наносов рек Азербайджанской ССР // Движение наносов в открытых руслах. – М.: Наука. – 1970. – 254 с.
69. Рухадзе Н.В. Динамические особенности русловых процессов горно-предгорных участков рек: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Тбилиси. – 1985. – 20 с.
70. Скородумов Д.Е. Гидравлические основы экстраполяции кривых расходов воды до высших уровней // Тр. ГГИ. – 1960. – Вып. 77.
71. Смищенко Б.Ф. Движение песчаных гряд в естественных водных потоках // Тр. ГГИ. – 1966. – Вып. 136. – С. 82-91.
72. Смищенко Б.Ф. О связи высоты песчаных гряд с параметрами речного потока и русла // Метеорология и гидрология. – 1980. – № 6. – С. 84-91.
73. Смищенко Б.Ф., Копалиани З.Д. О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // Тр. ГГИ. – 1978. – Вып. 252. – С. 20-37.
74. Смищенко Б.Ф., Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А. О масштабе времени русловых деформаций при моделировании на размываемых моделях речных русел // Тр. ГГИ. – 1977. – Вып. 242. – С. 55-60.
75. Талмаза В.Ф. К вопросу о транспортирующей способности рек горно-предгорной зоны // Известия АН Кирг. ССР. – 1963. – Серия естественных и технических наук. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 27-51.

76. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. – Фрунзе, Кыргызстан. – 1968. – 204 с.
77. Тимирова Р.В., Классен З.А. К вопросу определения расхода влекомых наносов на горно-предгорных участках рек // Тр. САНИИРИ. – 1970. – Вып. 124. – С. 197–205.
78. Умаров А.Ю. Исследования движения донных наносов на горных реках и влияние его на сопротивление, и кинематические характеристики турбулентного потока: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Ташкент. – 1968.
79. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов): ВСН 163-83. – 1985.
80. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки: СТО ГУ ГГИ 08.29-2009. – 2009. – 175 с.
81. Шамо́в Г.И. Речные наносы. – Л.: Гидрометеиздат. – 1954. – 378 с.
82. Шамо́в Г.И. Формулы для определения предельной скорости и расходов донных наносов // Тр. ГГИ. – 1952. – Вып. 36 (90). – С. 3-17.
83. Abrahams A.D., Gao P. A bed-load transport model for rough turbulent open-channel flows on plane beds // *Earth surface processes and landforms*. – 2006. – Vol. 31. – P. 910-928.
84. Amsler M.L., Schreider M.I. Dunes height prediction at floods in the Parana River, Argentina // *Proc. VII International Symposium on River Sedimentation (Hong Kong, China, 1998)*. – Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema. – 1998. – P. 615-620.
85. Annandale G.W. Reservoir Sedimentation // *Developments in water science*. – 1987. – № 29. – P. 78.
86. Ashmore P.E. Bed load transport in braided gravel-bed stream models // *Earth surface processes and landforms*. – 1988. – Vol. 13. – № 8. – P. 677-695.
87. Barry J.J., Buffington J.M., King J.G. A general power equation for predicting bed load transport rates in gravel bed rivers // *Water Resources Research*. – 2004. – Vol. 40. – W10401. – doi:10.1029/2004WR003190.
88. Bathurst J.C., Graf W.H., Cao H.H. Bed load discharge equations for steep mountain rivers. – In: *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Ed. by Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. – Wiley. – 1987. – P. 453-489.
89. Bhusal J.K. Quantification on bed load sediment transport in Tadi river of Nepal // *Proc. 10th International Symposium on River Sedimentation (Moscow, 2007)*. – 2007. – Vol. 3. – P. 31-37.
90. Bogardi J. Sediment transport in alluvial streams. – Budapest: Akademiai Kiado. – 1974. – 824 p.

91. Bombar G., Guney M.S. Experimental investigation of sediment transport in steady flows // Scientific Research and Essays. – 2010. – Vol. 5 (6). – P. 582-591.
92. Brahms A. Anfangsgründe der Deich und Wasserbaukunst. – 1753.
93. Brown C.B. Sediment Transportation. – In: Engineering Hydraulics. Ed. by Rouse H. – Wiley and Sons. – 1950. – P. 769-804.
94. Brownlie W.R. Compilation of alluvial channel data: laboratory and field // W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science California Institute of Technology. – Report № KH-R-43B. – Pasadena, California. – 1981. – 209 p.
95. Camenen B., Larson M. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport // Estuarine, coastal and shelf science. – 2005. – Vol. 63. – № 1-2. – P. 249-260.
96. Camenen B., Larson M. Bed-load transport by currents. – In: A unified sediment transport formula for coastal inlet application. ERDC/CHL CR-07-1. – 2007. – P. 186-206.
97. Chang H.H. Fluvial processes in river engineering. – Malabar, Florida: Krieger publishing company. – 1992. – 432 p.
98. D'Agostino V., Lenzi M.A. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon. Part II: Analysis of the bedload rate // Catena. – 1999. – Vol. 36. – Iss. 3. – P. 191-204.
99. Demiroz F. Initiation of particle motion. – In: UNESCO Post Graduate Course in Sediment Transport Technology. – Vol. 1. – Ankara-Turkey. – 1990. – P. 4.1-4.25.
100. Droge B., Nicodemus U., Schemmer H. Instruction for bed load and suspended material sampling (BfG-1718). – Koblenz. – 1992. – 32 p.
101. Du Buat L.G. Principes d'Hydraulique. – Paris. – 1816.
102. Einstein H.A. Formulas for the transportation of bed load // ASCE Transactions. – 1942. – Vol. 107. – Paper № 2140. – P. 561-577.
103. Estep M.A., Beschta R.L. Transport of bedload sediment and channel morphology of a Southeast Alaska stream. – USDA, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. – Research Note PNW-430. – October 1985. – 15 p.
104. Fernandez Luque R., Van Beek R. Erosion and transport of bed-load sediment // Journal of Hydraulic Research. – 1976. – Vol. 14. – № 2. – P. 127-144.
105. Garcia M.H. (Ed.). ASCE Manual of practice № 110: Sedimentation engineering: processes, management, modeling and practice. – 2008. – 1113 p.
106. Gill M.A. Height of sand dunes in open channel flows // Journal of Hydraulics Division. – 1971. – Vol. 97. – № 12. – P. 2067-2074.

107. Gladkov G.L. Hydraulic resistance in natural channels with movable bed // Proc. International Symposium East-West, North-South Encounter on the State-of-the-art in River Engineering Methods and Design Philosophies (St.-Petersburg, 1994). – 1994. – Vol. 1. – P. 81-91.
108. Guy H.P., Simons D.B., Richardson E.V. Summary of fluvial channel data from flume experiments, 1956-1961 // USGS Prof. Paper 462-1. – 1966. – 96 p.
109. Habersak H.M., Laronne J.B. Evolution and improvement of bed load discharge formulas based on Helley-Smith sampling in Alpine gravel bed river // Journal of Hydraulic Engineering. – 2002. – Vol. 128. – Iss. 5. – P. 484-499.
110. Holubova K. Some aspects of the bedload transport regime in the Slovak section of the Danube river // Proc. 20th Conference of the Danubian Countries. Conference abstracts (Bratislava, 2000). – 2000. – P. 74.
111. Huang J. Application of sandwave measurements in calculating bed load discharge // Erosion and Sedimentation Transport Monitoring Programmes in River Basins. – Proc. Oslo Symposium (1992). – 1992. – IAHS Publ. № 210. – P. 63-70.
112. Jaeggi M.N.R., Whittaker J.G. Discussion to Bathurst J.C., Graf W.H., Cao H.H. Bed load discharge equations for steep mountain rivers. – In: Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. (Eds.). Sediment transport in gravel-bed rivers. – Wiley. – 1987. – P. 453-489.
113. Julien P.Y. Erosion and sedimentation. – Cambridge University Press. – 1998. – 280 p.
114. Kiat C.C., Ghani A.A., Wen L.H. Development of modified Einstein bed-load equation for sandy stream in Malaysia // Proc. 2nd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Solutions Towards Sustainable River Basins: Rivers'07 (Riverside Kuching, Sarawak, Malaysia, June 6-8, 2007). – 2007. – P. 533-538.
115. Kleinhans M.G., Grasmejer B.T. Bed load transport on the shoreface by currents and waves // Coastal Engineering. – 2006. – Vol. 53. – № 12. – P. 983-996.
116. Lenzi M.A., D'Agostino V., Billi P. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon. Part 1: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment // Catena. – 1999. – Vol. 36. – Iss. 3. – P. 171-190.
117. Leopold L.B., Emmett W.W. Bedload measurements, East Fork river, Wyoming // Proc. the National Academy of Science, USA. – 1976. – Vol. 73. – Iss. 4. – P. 1000-1004.
118. Liu H.K. Discussion on systematic changes in beds of alluvial rivers by W.C. Carey and M.D. Keller // Journal of Hydraulics Research. – Vol. 84. – № 2. – 1958. – P. 1616-9-1616-15.
119. Low H.S. Effect of sediment density on bed-load transport // Journal of Hydraulic Engineering. – 1989. – Vol. 115. – Iss. 1. – P. 124-138.

120. Manual on Sediment Management and Measurement // WMO Operational Hydrology Report. – Geneva. – 2003. – № 7 (WMO № 948). – 158 p.
121. Milhous R.T. Discussion to Bathurst J.C., Graf W.H., Cao H.H. Bed load discharge equations for steep mountain rivers. – In: Thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. (Eds.). Sediment transport in gravel-bed rivers. – Wiley. – 1987. – P. 453-489.
122. Milhous R.T. Sediment transport in gravel-bottomed stream: PhD Thesis. – Oregon State University. – Corvallis. – 1973.
123. Paintal A. S. Concept of critical shear stress in loose boundary open channels // Journal of Hydraulic Research. – 1971. – Vol. 9. – № 1. – P. 91-113.
124. Pitlick J., Mueller E.R., Segura C., Cress R., Torizzo M. Relation between flow, surface-layer armoring and sediment transport in gravel-bed rivers // Earth Surface Processes and Landforms. – 2008. – Vol. 33. – P. 1192-1209.
125. Raudkivi A. Loose boundary hydraulics. – Rotterdam: A.A. Balkema. – 1988. – 495 p.
126. Recking A., Frey P., Paquier A., Belleudy P., Champagne J.Y. Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. // Water Resources Research. – 2008. – Vol.44.
127. Reid I., Layman J.T., Frostick L.E. The continuous measurements of bedload discharge // Journal of Hydraulic Research. – 1980. – Vol. 18. – Iss. 3. – P. 243-249.
128. Ribberink J.S. Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows // Coastal Engineering. – 1998. – Vol. 34. – № 1-2. – P. 59-82.
129. Rickenmann D. Bedload transport capacity of slurry flows at steep stones // Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. – ETH Zurich. – № 103. – 249 p. (in English).
130. Schoklitsch A. Der Geschiebetrieb und die Geschiebefracht // Wasserkraft und Wasserwirtschaft. – 1934. – Vol. 29. – № 4. – P. 37-43.
131. Shinohara K., Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels and rivers // Reports of Research institute for applied mechanics. – 1959. – Vol. 7. – № 25. – P. 15-45.
132. Shvidchenko A., Pender G., Hoey T. Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds // Water Resources Research. – 2001. – Vol. 37. – № 8. – P. 2273-2283.
133. Sirdari Z.Z., Ghani A.A., Hassan Z.A. Bedload transport of small rivers in Malaysia // International Journal of Sediment Research. – 2014. – Vol. 29. – P. 481-490.

134. Smart G.M. Predicting the sediment capacity of a channel. Challenges in African hydrology and water resources // Proc. of the Harare Symposium. – IAHS Publ. – 1984. – № 144. – P. 397-401.
135. Smart G.M. Sediment transport formula for steep channels // Journal of Hydraulic Engineering. – 1984. – Vol. 110. – № 3. – P. 267-276.
136. Soulsby R.L., Damgaard J.S. Bed load sediment transport in coastal waters // Coastal Engineering. – 2005. – Vol. 52. – № 8. – P. 673-689.
137. Suszka L. Modification of transport rate formula for steep channels // Fluvial Hydraulics of Mountain Regions. Lecture notes in Earth sciences. – 1991. – Vol. 37. – P. 59-70.
138. Talukdar S., Kumar B., Dutta S. Predictive capability of bedload equations using flume data // Journal of Hydrology and Hydromechanics. – 2012. – Vol. 60. – № 1. – P. 45-56.
139. Tsubaki T., Kawasumi T., Yasutomi T. On the influences of sand ripples upon the sediment transport in open channels // Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. – Vol.11. – № 8. – 1953. – P. 241-256.
140. Van Rijn L.C. Sediment transport by currents and waves. – Delft Hydraulics Report H 461. – 1989.
141. Van Rijn L.C. Sediment transport. Part 1: Bed load transport // Journal of Hydraulic Engineering. – 1984. – Vol. 110. – № 10. – P. 1431-1456.
142. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment // Journal of Hydraulic Engineering. – 2003. – Vol. 129. – № 2. – P. 120-128.
143. Williams G.P. Flume width and water depth effects in sediment transport experiments // Geological survey professional paper 562-H. – US Government printing office. – Washington. – 1970. – 30 p.
144. Wilson K.C. Analyses of bed-load motion at high shear stress // Journal of Hydraulic Engineering. – 1987. – Vol. 113. – № 1. – P. 97-103.
145. Wong M., Parker G. Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database // Journal of Hydraulic Engineering. – 2006. – Vol. 132. – № 11. – P. 1159-1168.
146. Yalin M.S. Mechanics of sediment transport. – Pergamon Press. – 1972. – 290 p.
147. Yang C.T. Sediment Transport Theory and Practice – NY: The McGraw Hill Companies, Inc. – 1996. – 395 p.
148. Zhou D., Liu D., Gao H. The development of sand bed load sampler for the Yangtze River // Proc. Florence Symposium (1981). – 1981. – IAHS Publ. № 133. – P. 35-46.

**Приложение А. Формулы разных исследователей для расчета высоты
гряд, скорости их перемещения и расхода донных наносов**

Таблица А.1 – Формулы для расчета высоты песчаных гряд (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
1. В.Ф. Пушкарев (1948) [59]	$h_r = H \left(0,00445 \frac{V^2}{gd} + 0,049 \right) \text{ м}$	<p>H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения? d – средний диаметр частиц, м.</p> <p>Получена в результате экспериментов с песчаным материалом в гидравлических лотках.</p> <p>В опытах автор использовал наносы со средним диаметром $d \geq 0,5$ мм.</p>
2. А.Ф. Кудряшов (1958) [50]	$h_r = d \frac{25,91 \left(\frac{V^2}{gH} - 0,251 \right)^2 + 1,08}{\left(\frac{V^2}{gH} + 0,07 \right)^2} \text{ м}$	<p>d – средний диаметр частиц, м, V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м.</p> <p>Получена в результате экспериментов с песчаным материалом на размываемых гидравлических моделях.</p> <p>В опытах автор использовал наносы со средним диаметром $d = 0,06$ мм и $d = 0,27$ мм.</p>
3. Доу Го-жень (1960) [21]	$h_r = 0,75 \frac{\omega}{V_{1к}} H \text{ м}$ $\omega = \theta V$ $\theta = \frac{0,8}{K_0} \left(1 + \frac{1}{3\psi} \right)$ $K_0 = 4,73 \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{8}}$	<p>ω – среднее из абсолютных значений компонента пульсационной скорости, м, H – глубина потока, м, θ, ψ – коэффициенты, K_0 – скоростной множитель, d – средний диаметр донных отложений, м, $V_{1к}$ – средняя скорость потока, отвечающая первому состоянию трогания частиц</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\psi = 0,25 \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{8}}$ $V_{\text{обр}} = V_{2\kappa} = V_0$ $V_{\text{разм}} = 4V_{1\kappa} = 3,2V_{2\kappa}$ $V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \text{ – по В.Н. Гончарову (1938).}$	<p>наносов, м/с, $V_{2\kappa}$ – начальная скорость трогания, м/с, V_0 – неподвижная скорость, м/с, $V_{\text{обр}}$ – скорость потока, соответствующая началу образования гряд, м/с, $V_{\text{разм}}$ – скорость, соответствующая размыву гряд, м/с.</p> <p>Формула дает реальные результаты, когда $V_{\text{обр}} < V \leq V_{\text{разм}}$, где</p> $V_{\text{обр}} = V_{2\kappa} = V_0$ $V_{\text{разм}} = 4V_{1\kappa} = 3,2V_{2\kappa}$ <p>(по наблюдениям автора в лабораторном лотке)</p> <p>Получена теоретическим путем.</p>
4. В.С. Кнороз (1960) [34]	$h_r = 3,5 \frac{H}{\lg \frac{H}{d} + 6} \left(\frac{V - V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ м}$ <p>для квадратичной области</p> $(d \geq 1,0-1,5 \text{ мм}) Re = \frac{vR}{\nu} \geq \frac{35 R}{\sqrt{\lambda} d}$ $V_0 = \frac{0,23}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\rho'gd}$ <p>для переходной области</p> $(0,25 \leq d \leq 1,0-1,5 \text{ мм}) \frac{5 R}{\sqrt{\lambda} d} \leq Re \leq \frac{35 R}{\sqrt{\lambda} d}$ $V_0 = \frac{0,445}{\sqrt{\lambda}} \nu^{0,136} (\rho'g)^{0,432} d^{0,296}$ <p>для области гладкого русла</p> $(d \leq 0,25 \text{ мм}) Re \leq \frac{5 R}{\sqrt{\lambda} d}$ $V_0 = \frac{0,71}{\sqrt{\lambda}} \nu^{0,3} (\rho'g)^{0,35} d^{0,05}$	<p>H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, d – средний диаметр донных отложений, м, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, Re – число Рейнольдса, $R = H$ – гидравлический радиус, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с, λ – гидравлический коэффициент трения. ρ_t, ρ – плотности частиц и воды, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, C – коэффициент Шези.</p> <p>Формула применима при $d \geq 0,5-0,7 \text{ мм}$ и $\frac{V}{V_0} \leq 2,5-2,7$.</p> <p>Получена в результате лабораторных экспериментов.</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\rho' = \frac{\rho_T - \rho}{\rho}$ $\lambda = \frac{2g}{C^2}$	
<p>5. А.Ш. Барекян (1962) [2-4]</p>	$h_r = 20,6H \frac{g}{C^2} \frac{V-V_0}{V_0} \text{ м}$ <p>a.</p> $V_0 = B \sqrt{g d_{cp}} \lg \frac{12,3H}{d_{cp}}$ $B = \frac{\gamma_T - \gamma_0}{\gamma_0} \frac{2\alpha a \cos \varphi}{\alpha_0 K_0}$ $d_{cp} = \sum_{i=1}^{i=n} d_i \beta_i$ $d_i = \frac{d_{n-1} \sqrt{d_{n-1} d_n} + d_n}{3}$ <p>b. При $0,25 \leq d_{cp} \leq 1,25$ мм</p> $V_0 = 2,9 \sqrt{d_{cp}} \lg \frac{12,3H}{d_{cp}}$ <p>При $d_{cp} > 1,25$ мм</p> $V_0 = 8,4 \sqrt[3]{d_{cp}^2} \lg \frac{12,3H}{d_{cp}}$	<p>H – глубина потока, м, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, C – коэффициент Шези, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц, γ_T – объемный вес наносов, γ_0 – объемный вес воды, B – безразмерная величина, $\frac{\cos \varphi}{\alpha_0 K_0}$ – характеризует форму частиц, α – безразмерный коэффициент, a – коэффициент, d_i – средняя крупность данной фракции, β_i – удельное содержание наносов данной фракции.</p> <p>Формула справедлива при $V_0 < V \leq 3,7V_0$.</p> <p>Выражение для V_0 может быть применено как для крупных, так и для мелких твердых частиц при $0,15 < d_{cp} < 1,5$ мм.</p> <p>Получена в результате лабораторных экспериментов.</p>
<p>6. Н.С. Знаменская (1968) [25]</p>	$\frac{h_r}{H} = f \left(\lg \frac{H}{d}, \frac{V}{V_0} \right)$ $V_0 = f(H, d)$	<p>h_r – высота гряды, м, H – глубина потока, м, d – средневзвешенный диаметр частиц, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с.</p> <p>График пригоден для определения высоты гряд h_r</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>до их разрушения.</p> <p>$0 < H \leq 12$ м, $0,24 \leq d \leq 500$ мм, $0,1 \leq V_0 \leq 3,25$ м/с, $0 < \frac{h_r}{H} \leq 0,6$, $1 < \lg \frac{H}{d} \leq 5$.</p> <p>Получена в результате лабораторных экспериментов.</p>
<p>7. Ю.М. Корчоха (1968) [46]</p>	$h_r = H \left(1,88 \left(\frac{V}{w} \right)^{0,165} - 2,30 \right) \text{ м при } \frac{V}{w} \leq 12$ $h_r = 50H \left(\frac{V}{w} \right)^{-1,65} e^{-0,022 \frac{V}{w}} \text{ м при } \frac{V}{w} \geq 12$	<p>H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с.</p> <p>Формулы справедливы для рек, русло которых состоит из песков со средним диаметром 0,2-5,0 мм, средние скорости течения не должны превышать 2,0 м/с.</p> <p>Получена в результате стационарных измерений на р. Полонети.</p>
<p>8. Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) [17, 18, 23]</p>	$h_r = 1,25H \left(\frac{V}{V_0} \frac{d_{50}}{H} \frac{w}{\sqrt{gH}} \right)^{0,2} \text{ м}$ $V_0 = 1,4w \left[\left(\frac{\sqrt{gd}}{w} + 1 \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\rho' + 1}} \right) \lg \frac{H}{d} \right]^{\frac{7}{6}}$ $\rho' = \frac{\rho}{\rho_T - \rho}$ $w = 1,4\sqrt{gd}$	<p>H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d_{50} – медианный диаметр частиц, м, w – гидравлическая крупность, м/с, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, ρ – плотность воды, кг/м³, ρ_T – плотность твердого вещества, кг/м³.</p> <p>При выводе использованы только те данные, в которых параметры гряд соответствовали данному гидравлическому режиму потока, т.е. $V > V_0$ для данного материала, а $\frac{h_r}{H} < 0,5$.</p> <p>В формулу следует подставлять параметры потока для данной вертикали, а не для всего живого сечения.</p>

Автор	Формула	Примечания
		Получена в результате лабораторных исследований движения частиц различной плотности
9. М. Жилль (1971) [106]	$h_r = \frac{H(1-Fr^2)}{2n\alpha} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau}\right) \text{ м}$ $\tau = \gamma HI$ $Re_{*d} = \frac{V_* d}{\nu}$ $V_* = \sqrt{gHI}$	<p>H – глубина потока, м, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда, $n = 3$, $\alpha = 0,6$ – коэффициент формы гряды, τ – касательное напряжение, τ_0 – по графику Шильдса (критическое значение касательного напряжения), γ – удельный вес воды, I – энергетический уклон (уклон свободной поверхности), Re_{*d} – число Рейнольдса частицы по динамической скорости, d – средний диаметр частиц, м, ν – кинематический коэффициент вязкости, τ_* – по графику Шильдса (критическое значение касательного напряжения), V_* – динамическая скорость, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.</p> <p>Получена теоретическим путем.</p>
10. Н.С. Знаменская (1976) [26]	$h_r = \frac{0,0001 l_r g H}{w^2} \text{ м при } 2 < \frac{V}{w} < 6$ $h_r = 0,62 l_r \left(\frac{w}{\sqrt{gH}}\right)^{0,5} \text{ м при } \frac{V}{w} > 6$	<p>l_r – длина гряды, м, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с.</p> <p>Получена в результате лабораторных экспериментов.</p>
11. Б.Ф. Снищенко (1980) [72]	$h_r = 0,25H \text{ м при } H \leq 1 \text{ м}$ $h_r = 0,2 + 0,1H \text{ м при } H > 1 \text{ м}$	<p>H – глубина потока, м.</p> <p>Получена в результате обобщения данных</p>

Автор	Формула	Примечания
		лабораторных и натурных исследований.
12. З.Д. Копалиани (1989) [40]	$h_r = 0,39d \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2,5} Fr^{-3,75} \text{ м}$ $V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \text{ – по В.Н. Гончарову (1938) [11].}$	d – средний диаметр частиц, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда. Получена в результате обобщения данных лабораторных и натурных исследований.
13. Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани (1989) [40]	$h_r = 2,1 \frac{d}{Fr^{4,1}} \left(\frac{V-V_0}{V_0}\right)^{1,4} \text{ м}$ $V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \text{ – по В.Н. Гончарову (1938) [11].}$	d – средний диаметр частиц, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда. Получена в результате обобщения данных лабораторных и натурных исследований.
14. Д.В. Носелидзе (1992) [55]	$h_r = H \left(0,07 \frac{V}{V_0} + 0,02\right) \text{ м}$	H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с. Формула рекомендована для $30 < \frac{H}{d} < 150$.
15. С. Ялин (1992) [24]	$h_r = 0,10H \text{ м}$	H – глубина потока, м. Установлена теоретическим путем.
16. М.Л. Амслер, М.И. Шредер (1998) [84]	$h_r = H \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{-0,3} (5,05 \ln(V^2) + 0,71) \text{ м}$	H – средняя глубина потока, м, d_{50} – медианное значение крупности частиц, м, V – средняя скорость течения на вертикали, что для плоского потока соответствует средней скорости потока, м/с. Формула дает хорошие результаты при $V \geq 1,20$ м/с, $H \geq 20$ м.

Автор	Формула	Примечания
		Выведена на основании данных измерений характеристик песчаных гряд в р. Паране.
17. А.А. Костюченко, З.Д. Копалиани (2006) [47]	$h_r = 0,13H$ м	H – глубина потока, м. Получена в результате обобщения данных лабораторных и натурных исследований.

Таблица А.2 – Формулы для расчета скорости перемещения песчаных гряд (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
1. В.Н. Гончаров, Г.Н. Лапшин (1938) [11]	$C_r = \frac{0,00034V^3}{V_1^3 h_r} \left(\frac{\Delta^{0,2}}{A} + \frac{7,14d^{1,1}}{H^{0,7}} \right) (V - V_1 H^{0,2})$ $h_r = 0,053H^3 \sqrt{1 + \frac{1}{H} \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right)}$ $V_1 = V_0 \left(\frac{1}{H} \right)^{0,2}$ $V_0 = 3H^{0,2} \sqrt{(d + 0,0014)^{0,6}}$ $\Delta = \Delta_0 + 0,0005 \text{ м}$ $\Delta_0 = (0,35 \dots 0,40)d$ $A = 1 + \alpha \frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma} \sqrt{\frac{V}{V - V_1 H^{0,2}}}$ $\alpha = 0,15-0,45 \text{ (для песчаных и гравелистых наносов)}$	V – скорость потока, м/с, H – глубина потока, м, Δ – приведенная шероховатость дна, м Δ_0 – абсолютная шероховатость дна, м γ_T – удельный вес наносов, γ – удельный вес воды, V_0 – неподвигающаяся скорость потока глубиной H (при которой расход наносов данной крупности равен нулю), V_1 – неподвигающаяся скорость потока глубиной 1 м, d – средний диаметр частиц однородных наносов, м, A – величина отношения средней скорости потока к скорости движения массы взвешенных наносов, α – коэффициент. Получена в результате теоретических исследований и экспериментов в гидравлических лотках.

Автор	Формула	Примечания
		Опыты проводились в следующих условиях: $0,5 \leq d \leq 7,0$ мм, $H = 0,1-0,2$ м, $V = 0,24-0,36$ м/с.
2. В.Ф. Пушкарев (1948) [59]	$C_{\Gamma} = 0,0188 \frac{V^3}{gH} - 0,0292 \frac{gd}{V} \text{ м/с}$	V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, d – средний диаметр частиц, м. Для получения формулы автор использовал наносы крупностью $d \geq 0,5$ мм. Получена в результате лабораторных экспериментов.
3. Т. Цубаки, Т. Кавасуми, Т. Ясутоми (1953) [139]	$C_{\Gamma} = 7,03 \frac{I\sqrt{gd}}{\sqrt{\frac{\gamma_{\Gamma}-\gamma}{\gamma}}} \text{ м/с}$	I – уклон, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр частиц, м, γ_{Γ} – удельный вес наносов, γ – удельный вес воды. $d = 1,03-2,28$ мм – средний диаметр наносов, использованных в опытах. Получена в результате наблюдений в каналах.
4. Н.Х. Брукс (1955) [73]	$C_{\Gamma} = 0,000367V^5 \text{ м/с}$ $C_{\Gamma} = 0,0006V^5 \text{ м/с}$	V – скорость потока, м/с. Первая формула выведена для наносов диаметром $d = 0,1$ мм, вторая – для $d = 0,16$ мм. Получена в результате наблюдений в малых реках.
5. М.А. Великанов, Е.М. Минский (1955) [9]	$C_{\Gamma} = 0,22(V - 0,25)^{2,25} \text{ см/мин}$	V – скорость потока, м/с. Получена в результате исследований в аэродинамической трубе.

Автор	Формула	Примечания
		<p>Полученная зависимость была пересчитана на воду.</p> <p>$V = 0-14$ м/с, $d < 1$ мм.</p>
<p>6. А.Ф. Кудряшов (1958) [50]</p>	$C_r = 0,00788 \frac{V^4}{H^{5/4} g^{3/2} d^{1/4}} \text{ м/с} \quad \text{при } Fr = \frac{V^2}{gH} \leq 1,$ $C_r = \sqrt[3]{\frac{Igd^2}{H}} - 2,84 \frac{gd}{V} \text{ м/с} \quad \text{при } Fr = \frac{V^2}{gH} \geq 1$ <p>– только для гряд $C_r > 0$</p>	<p>V – скорость потока, м/с, H – глубина потока, м, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр частиц, м, I – уклон.</p> <p>Получена в результате теоретических исследований, лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений.</p> <p>$d = 0,06$ и $0,27$ мм – средний диаметр наносов, использованных в опытах.</p>
<p>7. Доу Го-жень (1960) [21]</p>	$C_r = 0,26 \frac{d}{H} (V - V_{1к}) \frac{V^2}{V_{1к}^2} \text{ м/с}$ $V_{обр} = V_{2к} = V_0$ $V_{разм} = 4V_{1к} = 3,2V_{2к}$ $V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \quad \text{– по В.Н. Гончарову (1938) [11].}$	<p>d – средний диаметр частиц, м, H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, $V_{1к}$ – средняя скорость потока, отвечающая первому состоянию трогания частиц наносов, м/с, $V_{2к}$ – начальная скорость трогания, м/с, V_0 – неподвижная скорость, м/с, $V_{обр}$ – скорость потока, соответствующая началу образования гряд, м/с, $V_{разм}$ – скорость, соответствующая размыву гряд, м/с.</p> <p>Получена в результате опытов в лабораторном лотке.</p> <p>Формула дает реальные результаты, когда $V_{обр} < V \leq V_{разм}$, где</p>

Автор	Формула	Примечания
		$V_{\text{обр}} = V_{2к} = V_0$ $V_{\text{разм}} = 4V_{1к} = 3,2V_{2к}$ (по наблюдениям автора в лабораторном лотке).
8. В.С. Кнороз (1960) [34]	$C_r = 0,425\sqrt{gd} \left(\frac{V-V_0}{\sqrt{gH}} \right)^{2,5} \text{ м/с}$ <p>для квадратичной области $(d > 1,0-1,5 \text{ мм}) Re = \frac{VR}{\nu} \geq \frac{35 R}{\sqrt{\lambda} d}$</p> $V_0 = \frac{0,23}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\rho'gd}$ <p>для переходной области $(0,25 \leq d \leq 1,0-1,5 \text{ мм}) \frac{5 R}{\sqrt{\lambda} d} \leq Re \leq \frac{35 R}{\sqrt{\lambda} d}$</p> $V_0 = \frac{0,445}{\sqrt{\lambda}} \nu^{0,136} (\rho'g)^{0,432} d^{0,296}$ <p>для области гладкого русла $(d < 0,25 \text{ мм}) Re \leq \frac{5 R}{\sqrt{\lambda} d}$</p> $V_0 = \frac{0,71}{\sqrt{\lambda}} \nu^{0,3} (\rho'g)^{0,35} d^{0,05}$ $\rho' = \frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho}$ $\lambda = \frac{2g}{C^2}$	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр частиц, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразрывающаяся скорость, м/с, H – глубина потока, м, Re – число Рейнольдса, λ – гидравлический коэффициент трения, ν – кинематический коэффициент вязкости, R – гидравлический радиус. Формула применима при $d > 0,5-0,7 \text{ мм}$ и $\frac{V}{V_0} \leq 2,5-2,7$. Получена в результате лабораторных экспериментов.
9. А.Ш. Барекян (1962) [2-4]	$C_r = 0,0153 \frac{V^3}{gH} \text{ м/с}$	V – средняя скорость потока, H – средняя глубина потока, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Формула справедлива при $V_0 < V \leq 3,7V_0$. Получена в результате теоретических и лабораторных исследований.
10. Н.С. Знаменская (1963) [27]	$C_r = 0,0011 \frac{H}{h_r} (V - V_0) \text{ см/с}$ $V_0 = f(H, d)$	H – средняя глубина потока, м, h_r – высота гряды, м,

Автор	Формула	Примечания
	$\frac{h_r}{H} = f\left(\frac{V}{V_0}, \lg \frac{H}{d}\right)$	<p>V – скорость потока, м/с, V_0 – неразрывающаяся скорость, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.</p> <p>Выражение справедливо для установившегося течения в лаборатории и в природе.</p> <p>Получена в результате теоретических исследований и лабораторных экспериментов.</p>
<p>11. Н.С. Знаменская (1968) [25]</p>	$C_r = 2,5 \frac{h_r}{l_r} \text{ см/с}$ $\frac{h_r}{l_r} = f\left(Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}, \frac{V}{w}\right)$	<p>h_r – высота гряды, м, l_r – длина гряды, м, Fr – число Фруда, V – скорость потока, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с.</p> <p>Формула пригодна для активно движущихся гряд устойчивого профиля для приближенных расчетов и непригодна для рифелей.</p> <p>Получена в результате теоретических исследований и лабораторных экспериментов.</p>
<p>12. Ю.М. Корчоха (1968) [46]</p>	$C_r = 0,685V \sqrt{\frac{d}{h_r}} - 0,0109 \text{ м/мин}$ $h_r = H \left(1,88 \left(\frac{V}{w}\right)^{0,165} - 2,30\right) \quad \text{при } \frac{V}{w} < 12$ $h_r = 50H \left(\frac{V}{w}\right)^{-1,65} e^{-0,022 \frac{V}{w}} \quad \text{при } \frac{V}{w} > 12$	<p>V – скорость потока, м/с, d – средний диаметр частиц, м, h_r – высота гряды, м, H – средняя глубина потока, м, w – гидравлическая крупность, м/с.</p> <p>Действительна для рек, русло которых состоит из песков со средним диаметром 0,2-5,0 мм, средние скорости течения не должны превышать 2,0</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>м/с.</p> <p>Получена по наблюдениям в р. Поломети.</p>
<p>13. Г.В. Железняков, В.К. Дебольский (1971) [17, 18, 23]</p>	$C_r = 0,001\sqrt{gd} \left(\frac{V}{V_0} \sqrt{\frac{w}{V_0 h_r}} \right)^2 \text{ м/с}$ $h_r = 1,25H \left(\frac{V d_{50}}{V_0 H} \frac{w}{\sqrt{gH}} \right)^{0,2}$ $V_0 = 1,4w \left[\left(\frac{\sqrt{gd}}{w} + 1 \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\rho' + 1}} \right) \lg \frac{H}{d} \right]^{\frac{7}{6}}$ $\rho' = \frac{\rho}{\rho_T - \rho}$ $w = 1,4\sqrt{gd}$	<p>V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с, ρ – плотность воды, кг/м³, ρ_T – плотность твердого вещества, кг/м³.</p> <p>При выводе формулы использованы только те данные, в которых параметры гряд соответствовали данному гидравлическому режиму потока, т.е. $V > V_0$ для данного материала, а $\frac{h_r}{H} < 0,5$.</p> <p>Получена по результатам экспериментов в гидравлических лотках с частицами разной плотности.</p>
<p>14. О.М. Кондеп, Р.Ж. Гарде (1973) [73]</p>	$C_r = 0,021VFr^3 \text{ м/с}$	<p>V – скорость потока, м/с, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда.</p> <p>Получена в результате натуральных и лабораторных исследований.</p>
<p>15. Б.Ф. Снисенко, З.Д. Копалиани, О.А. Твалавадзе (1977) [74]</p>	$C_r = 0,032(V - V_0) \frac{V}{V_0} \left(\frac{d}{h_r} \right)^{0,7} \text{ м/с}$ <p>$V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3}$ – по В.Н. Гончарову (1938).</p>	<p>V – скорость потока, м/с, V_0 – неподвижная скорость, м/с, d – средний диаметр частиц, м, h_r – высота гряды, м.</p> <p>Получена по лабораторным и натурным данным.</p>
<p>16. Б.Ф. Снисенко, З.Д. Копалиани</p>	$C_r = 0,019VFr^{2,9} \text{ м/с}$	<p>V – скорость потока, м/с, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ – число Фруда.</p>

Автор	Формула	Примечания
(1978) [73]		Получена по лабораторным и натурным данным.
17. 3.Д. Копалиани (1989) [40]	$C_r = 0,009V \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \left(\frac{h_r}{d}\right)^{-0,8} \text{ м/с}$ $V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3} \text{ – по В.Н. Гончарову (1938).}$	V – скорость потока, м/с, V_0 – неподвижная скорость, м/с, d – средний диаметр частиц, м, h_r – высота гряды, м. Получена по лабораторным и натурным данным.

Таблица А.3 – Формулы для скорости перемещения гряд (теоретические) (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
1. Дикон (1892) [73]	$C_r = kV^n$	k – коэффициент пропорциональности, $n > 1$.
2. Санжен (1905) [73]	$C_r = 0,00013(V_1^2 - 0,11)$	–
3. Экснер (1920) [9]	$C_r = \frac{kV}{H} = \frac{md}{H} V$	k – коэффициент пропорциональности твердого расхода P скорости потока, $P = kV$, m – коэффициент динамической сплошности (отношение суммарного объема движущихся частиц ко всему объему сплошного слоя толщиной d). Получена теоретически.
4. Н.Т. Повало-Швейковский (1938) [56]	$C_r = \frac{\sigma \lambda d V_d}{q dz}$	V_d – скорость придонного слоя, $V_d = V_d(\eta)$, η – высота рельефа от какой-либо горизонтальной плоскости, z – высота рельефа над условной плоскостью отсчета, u – скорость перекачивания песчинок, $u = \lambda V_d$, λ – коэффициент пропорциональности, σ – средняя плотность перекачиваемой массы песка в придонном слое,

Автор	Формула	Примечания
		<p>q – множитель пропорциональности, зависящий от свойств, формы и размеров зерен песка, т.е. от степени уплотнения песка при его осаждении.</p> <p>Получена теоретически.</p>
5. А.Г. Андерсен (1953) [73]	$C_r = -m \frac{2\pi V}{l_r} \frac{1}{2} \operatorname{cth} \left(2\pi \frac{H}{l_r} \right)$	–
6. Г. Полия (1955) [9]	$C_r = \frac{\sigma}{\tau} \frac{\left(\frac{l_r}{\sigma}\right)^2}{4\pi^2 + \left(\frac{l_r}{\sigma}\right)^2}$	<p>σ, τ – некоторые постоянные коэффициенты, σ – некоторая длина, τ – некоторое время, $\frac{\sigma}{\tau}$ – скорость, вероятно, пропорциональная средней скорости потока.</p> <p>Получена теоретически (статистический подход).</p>
7. Х.К. Лиу (1958) [118]	$C_r = kV^n$	<p>$d_{cp} = 0,10-0,68$ мм – средний диаметр наносов, использованных в опытах.</p> <p>$[V] = \phi/c,$ $k = M * 10^{-4},$ $M = 1-10,$ $n = 5.$</p> <p>Получена по данным лабораторных и натурных измерений.</p>
8. Дж.Ф. Кеннеди (1963) [73]	$C_r = - \left(\eta \bar{q}_T \frac{k}{\gamma_H} \right) \operatorname{cthk} (H_{гЛ} - H) \operatorname{cosk} \delta$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$	<p>k – волновое число, η – отметка дна, δ – величина, характеризующая фазовое расстояние запаздывания.</p>
9. З. Томас (1967) [73]	$\log \frac{C_r}{V} = 3,342 \log \frac{V_* d_{cp}}{V} - A$	При $I = 0,001$ $A = 4,936.$
10. Ю.Т. Борщевский (1968) [73]	$C_r = \operatorname{const} \left(\frac{V - V_0}{w} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{d}{H} \right)^{\frac{3}{4}} \sqrt{h_r g}$	–
11. Де Врис (1978) [73]	$C_r = V \frac{\psi}{1 - Fr^2}$	<p>При $I = 0,002$ $A = 7,114, \psi = b \frac{q_T}{q}.$</p> <p>$b$ – показатель степени в уравнении расхода донных наносов вида</p>

Автор	Формула	Примечания
		$q_T = dV^b$.
12. Мерцер (1978) [73]	$C_T = -m \frac{2\pi HV}{l_r^2} ch2\pi \frac{H}{l_r}$	m – опытный коэффициент.
13. Нуритдинов (1978) [73]	$C_T = 0,007\omega \left(\frac{V}{V_0} - 1\right)^{2,92}$	ω – завихренность у дна, связанная с угловой скоростью вращения жидких частиц в эллиптическом вихре.
14. Чанг, Панде (1978) [73]	$C_T = kV^n$	–
15. Шуляк (1978) [73]	$C_T = 3 \cdot 10^{-7} \bar{G}$	$G_{iv} = \frac{\rho q d^3}{\rho V^2}$ – критерий комплексного гравитационно-инерционно-вязкостного процесса (динамическая характеристика волн на поверхности сыпучей среды), $\beta_T = \left(1 - \frac{w}{V}\right), \beta_K = \left(1 - \frac{V_0}{V}\right), \alpha_K = \left(1 + \frac{V_0}{V}\right)$.

Таблица А.4 – Формулы для расчета расхода донных наносов, не учитывающие в явном грядовую структуру их транспорта (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
1.1 – Расход донных наносов в функции скорости потока		
1. М.А. Великанов [1]	$q_T = 491 d_{cp} V^3 (V - V_0)$ кг/с/м $V_0 = 1,035 \sqrt{gd} \lg \frac{8,8H}{d_{95}}$	d_{cp} – средняя крупность наносов, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, $g = 9,81$ м/с ² – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, d_{95} – крупность наносов 95% вероятности по гранулометрической кривой, м.
2. В.Н. Гончаров (1933) [13]	$q_T = 0,00078 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 d (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,1}$ м ³ /с/м $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} 0,96 \sqrt{gd}^{0,2} (d + 0,0014)^{0,3} \left(\frac{H}{d}\right)^{0,2}$	V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d – средняя крупность наносов, м, H – глубина потока, м, d_{50} – крупность наносов 50% вероятности по гранулометрической кривой, м, d_{90} – крупность наносов 90%

Автор	Формула	Примечания
		вероятности по гранулометрической кривой, м, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.
3. В.Н. Гончаров (1938) [11]	$q_T = \frac{d}{10,8^3} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,1} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ <p>или</p> $q_T = 2,08d \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,1} \text{ кг}/\text{с}/\text{м} - \text{ для } \rho_T = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$ <p>1. $V_0 = 6,8 \left(H \frac{d}{d_{max}}\right)^{0,2} \sqrt{\frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma} (d + 0,0014)}$</p> <p>или</p> <p>2. $V_0 = 3,9 \left(H \frac{d}{d_{max}}\right)^{0,2} d^{0,3} \text{ м}/\text{с}$ [82]</p>	d – средняя крупность наносов, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, H – глубина потока, м, d_{max} – максимальная крупность наносов, м, γ – удельный вес воды, Н/м ³ , γ_T – удельный вес наносов, Н/м ³ . Рекомендована для однородных наносов.
4. Л.Г. Гвеле сиани (1946) [82]	$q_T = 12,95 \frac{dV_0}{\left(\lg \frac{12d_{max} + d}{d}\right)^2} \left(\frac{V^3}{V_0^3} - 1\right) \left(\frac{V}{V_0} - 1\right) \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$ $V_0 = 3,4 \frac{\lg\left(\frac{8,8H}{d}\right)}{\lg\left(\frac{12d_{max} + d}{d}\right)} \sqrt{d} \text{ м}/\text{с}$	V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d_{max} – максимальный диаметр наносов, м, d – средний диаметр наносов, м, V – скорость потока, м/с.
5. Г.И. Шамо в (1952) [82]	<p>1. $q_T = 0,95\sqrt{d} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$ – для однородных грунтов,</p> <p>2. $q_T = \alpha^3 \sqrt{d_{max}^2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$ – для смешанного состава наносов.</p> <p>$\alpha = 3$, если наибольшая фракция в составе наносов составляет 40-70% от суммы пробы, $\alpha = 2,5$ – 20-40% или 70-80%, $\alpha = 1,5$ – 10-20% или 80-90%</p> $V_0 = 3,83d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{6}}$	d – средний диаметр наносов, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – предельная средняя скорость потока, при которой донные наносы прекращают движение, м/с, H – глубина потока, м, α – коэффициент, $\overline{d_{max}}$ – средний диаметр наибольшей фракции наносов, составляющей не менее 10% состава подвижной части донных наносов, м. Рекомендована для рек с песчаным и песчано-гравелистым дном. $d \geq 0,1 \text{ мм}$. По данным Караушева,

Автор	Формула	Примечания
		верхний предел применимости формулы $d \leq 50$ мм.
6. И.И. Леви (1957) [13]	$q_T = 0,00076 \left(\frac{V}{\sqrt{gd_{50}}} \right)^3 d_{50} (V - V_0) \left(\frac{d_{90}}{H} \right)^{0,25} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ <p>1. для квадратичной области ($Re_d > 25, d_{50} > 1,5$ мм)</p> $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} 1,3 \sqrt{gd_{50}} \lg \frac{12H}{d_{90}}$ <p>для переходной области ($0,25 < d_{50} < 1,5$ мм)</p> $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} 32 d_{50}^{0,25} \left(\lg \frac{7,5H}{d_{50}} - 5,5 d_{50} \right)$ <p>– $[H, d] = \text{см}, [V_0] = \text{см}/\text{с},$ коэффициенты размерные.</p> <p>для области гладкого русла ($d_{50} < 0,25$ мм)</p> $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} \frac{90 d_{50}^{0,05} H^{0,125}}{\sqrt{H^{0,25} + 7,5}} - [H, d] = \text{см},$ $[V_0] = \text{см}/\text{с}, \text{ коэффициенты размерные.}$ <p>2. для квадратичной области ($Re_d > 25, d_{50} > 1 \dots 1,5$ мм):</p> $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}} \right)^{0,1} \frac{C}{\sqrt{g}} V_{*0}$ $V_{*0} = 0,16 \sqrt{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) gd_{50}}$	<p>V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения, d_{50} – крупность наносов 50% вероятности по гранулометрической кривой, м, V_0 – неразмывающая скорость (по В.С. Кнорозу), м/с, V_{*0} – критическая динамическая скорость (по В.С. Кнорозу), м/с, d_{90} – крупность наносов 90% вероятности по гранулометрической кривой, м, H – глубина потока, м.</p> <p>Рекомендована для $d > 0,5 \dots 1,0$ мм, $\frac{d}{H} > 2 * 10^{-4}$.</p>
7. Доу Го-жень (1960) [21]	$q_T = 0,048 d (V - V_0) \frac{\omega}{V_0} \frac{V^2}{V_0^2} \text{ объем}/\text{ед. времени}/\text{ед. ширины потока (принято м}^3/\text{с}/\text{м)}$ $\omega = 0,8 \left(1 + \frac{1}{0,75 \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{8}} \sqrt{gHI}} \right)$	<p>d – диаметр донных наносов, м, V – скорость потока, м/с, V_0 – критическая скорость начала движения частиц, м/с, ω – среднее абсолютное значение пульсационной скорости, м/с, H – глубина потока, м, I – уклон, γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$V_0 = \frac{\sqrt{\frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma}} g d \sqrt{2,4 + 1,6H} \left(1 - \frac{1}{1,5 \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{8}} + 3} \right)}{1 - \frac{1}{0,5 \left(\frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{8}} + 1} \left(\frac{d}{H} \right)^2}$	<p>Н/м³.</p> <p>При замене диаметра частиц их средним значением (по весу) формула может применяться для приближенного расчета расхода смешанных наносов.</p>
8. В.Н. Гончаров (1962) [12]	<p>1. $q_T = \frac{(1+\varphi)}{800} d V_0 \left(\frac{V^3}{V_0^3} - 1 \right) \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right)$ м³/с/м</p> <p>или</p> <p>2. $q_T = 1,2(1 + \varphi) d V_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{4,33}$ кг/с/м</p> $V_0 = \lg \frac{8,8H}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\gamma_T - \gamma)d}{3,5\gamma}}$ <p>При $d = 0,15-0,5$ мм $\varphi = 2,25$, при $d = 0,5-1,5$ мм $\varphi = 1,23$, при $d > 1,5$ мм $\varphi = 1,0$.</p>	<p>φ – параметр турбулентности, d – диаметр частиц, приведенный к диаметру шара, равного по объему частице наносов, м, V_0 – несдвигающая скорость, м/с, V – скорость потока, м/с, Н/м³. d_5 – диаметр наиболее крупных частиц, доля которых от их общего количества составляет 5%, м (принято d_{95}), $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³.</p> <p>Рекомендована для песчано-гравелистых наносов. $0,1 \leq d \leq 10$ мм.</p>
9. В.Ф. Галмаза (1963) [75]	<p>1. $q_T = \frac{\alpha \rho_T}{\sqrt{g}} V \sqrt{d} \left(\frac{d}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 (V - V_0)$ кг/с/м</p> <p>или</p> <p>2. $q_T = k \frac{V^4}{\sqrt{H}} (V - V_0)$ кг/с/м</p> $V_0 = 2,8 \sqrt[4]{d_{max} H}$ <p>Для мало окатанных песчано-галечниковых наносов пластинчатой формы $\alpha = 0,0012, k = 0,05$, для хорошо окатанных наносов, близких по форме к эллипсоиду $\alpha = 0,0018, k = 0,07$.</p>	<p>α – безразмерная величина, ρ_T – плотность наносов, Н/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, V – скорость потока, м/с, d – средний диаметр наносов, м, H – глубина потока, м, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, k – безразмерная величина, d_{max} – максимальный диаметр наносов, м.</p>

Автор	Формула	Примечания
<p>10. А.Н. Крошкин (1968) [76]</p>	$q_T = \frac{0,001}{m} H \sqrt{I} (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{4,2(1+Fr)}$ <p>(принято м³/с/м)</p> $m = 1,5 + 0,314 \frac{C}{\sqrt{g}}$ $C = \frac{V}{\sqrt{HI}}$ <p>при $m \leq 4$ $V_0 = 2,8^4 \sqrt{Hd}$ или $V_0 = 0,70 \sqrt{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right) g^4 H d}$</p> <p>при $m > 4$</p> $V_0 = 1,4 \frac{m-1,5}{m+1} \left(\frac{H}{d}\right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right) dg}$ $Fr = \alpha \frac{V^2}{gH}$ $\alpha = \frac{(m+1)^3}{m^2(3+m)}$	<p>m – безразмерная величина, H – глубина потока, м, I – уклон, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d – средний диаметр наносов, м, $Fr = \alpha \frac{V^2}{gH}$ – число Фруда, α – безразмерная величина, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, C – коэффициент Шези, ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м³.</p> <p>Формула предназначена для расчета расхода влекомых наносов на реках горно-предгорной зоны при $Fr < 1$.</p> <p>Получена на основе полевых и лабораторных исследований разных авторов и анализе существующих зависимостей.</p>
<p>11. К.И. Россинский (1968) [31]</p>	<p>для однородного состава донных отложений (песчаного):</p> $q_T = 0,20 \rho_T V d k \left(\eta - \frac{V_{0d}}{kV} (\eta - \eta_B) + 0,40 \frac{\sigma_x}{\bar{V}_d} \exp\left(\frac{-\left(\frac{V_{0d}}{kV} - 1\right)^2}{2\left(\frac{\sigma_x}{\bar{V}_d}\right)^2}\right) \right) \text{ кг/с/м,}$ <p>для неоднородного состава донных отложений:</p> $q_T = 0,20 \rho_T V \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{100} d_i k_i \left(\eta_i - \frac{V_{0di}}{k_i V} (\eta_i - \eta_{Bi}) + 0,40 \frac{\sigma_x}{\bar{V}_d} \exp\left(\frac{-\left(\frac{V_{0di}}{k_i V} - 1\right)^2}{2\left(\frac{\sigma_x}{\bar{V}_d}\right)^2}\right) \right) \text{ кг/с/м}$ $\eta = \eta(x_1)$	<p>ρ_T – плотность наносов, кг/м³, d – средний диаметр донных наносов, м, V – средняя скорость потока на вертикали (или по сечению), м/с, η – коэффициент сплошности движения всех влекомых наносов (перекатывающихся и сальтирующих), η_B – то же для сальтирующих наносов, \bar{V}_d – осредненная донная скорость потока, м/с, V_{0d} – мгновенная донная скорость, сдвигающая частицы, м/с, σ_x – среднее квадратическое значение продольных пульсаций скорости в придонной области, k – отношение донной скорости к средней скорости</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\eta_B = \eta_B(x_2)$ $x_1 = \frac{V_{0д} - 1}{\frac{\sigma_x}{V_d}}$ $x_2 = \frac{V_{дв} - 1}{\frac{\sigma_x}{V_d}}$ $V_{0д} = 7,7\sqrt{d}$ $V_{0д_i} = 7,7b\sqrt{d_i}$ $b = b\left(\frac{d}{d_i}\right)$ $V_{дв} = 10,8\sqrt{d}$ $V_{дв_i} = 10,8\sqrt{d_i}$ $k = \frac{1,25}{\lg\left(6,15\frac{H}{0,7d}\right)}$ $k_i = \frac{\lg\left(11,7\frac{d_i}{d} + 0,50\right)}{\lg\left(6,15\frac{H}{0,7d}\right)}$ $\frac{\sigma_x}{V_d} = \frac{\sigma_x}{V_d}\left(\frac{d}{H}\right)$	<p>потока, <i>i</i> – индекс, обозначающий среднее значение какой-либо величины для данной фракции, $V_{дв}$ – обезвешивающая донная скорость.</p>
<p>12. К.В. Гришанин (1969) [13]</p>	$q_T = 0,015 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 d(V - V_0) \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} 0,96\sqrt{gd}^{0,2} (d + 0,0014)^{0,3} \left(\frac{H}{d}\right)^{0,2} - \text{ по В.Н. Гончарову}$	<p>V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d – средний диаметр донных наносов, м, d_{50} – крупность наносов 50% вероятности по гранулометрической кривой, м, d_{90} – крупность наносов 90% вероятности по гранулометрической кривой, м, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>свободного падения, H – глубина потока, м.</p> <p>При выводе формулы использованы данные о межженных деформациях русла на перекатах крупных равнинных рек СССР и данные измерений песчаных гряд на одном их перекатов Нижней Волги.</p> <p>Формула выведена для донных отложений крупностью $d = 0,2 \dots 0,7$ мм. Применение формулы ограничено $\frac{d}{H} < 5 * 10^{-4}$.</p>
<p>13. В.Н. Лазарев, Ф.М. Чернышов (1974) [51]</p>	$q_T = 0,1 \left(\frac{d}{H}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{d}{w} \sqrt{\frac{V-V_0}{w}} (V - V_0)^2 \frac{q}{H\sqrt{gH}}$ <p>м³/с/м</p> $V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}}$ <p>– по Г.И. Шамову.</p> <p>w – по В.В. Романовскому [31].</p>	<p>d – средний диаметр наносов, м, H – глубина потока, м, w – гидравлическая крупность, м/с, V – скорость потока, м/с, V_0 – неподвижная скорость, м/с, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – крупность наносов 50% вероятности по гранулометрической кривой, м, d_{90} – крупность наносов 90% вероятности по гранулометрической кривой, м.</p> <p>Получена по натурным данным. Русловые съемки на перекатах верхней Лены за 1968-1972 гг. Русловые деформации определялись по изменениям емкости русла.</p> <p>Предназначена для крупнозернистых песков, гравия и гальки.</p>
<p>14. И.Ф. Карасев (1975) [29]</p>	$q_T = 0,006 \frac{\gamma d C^2 V^2 (V - V_0)}{(\gamma_T - \gamma) g^2 H} \eta$ <p>м³/с/м</p>	<p>γ – удельный вес воды, Н/м³, d – средний диаметр наносов, м,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\eta = 1,08 - 0,58 \left(\frac{V_c}{V} \right)^2$ $V_c = 1,43V_0$ <p>1. $V_0 = 1,15\sqrt{g(Hd)^{0,25}}$ – Б.И. Студеничников</p> <p>2. $V_c = \lg \frac{8,8H}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\gamma_T - \gamma)d}{1,75\gamma}}$ – В.Н. Гончаров</p>	<p>C – коэффициент Шези, V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, η – интеграл вероятности срыва, V_c – срывающая скорость, м/с, d_5 – диаметр наиболее крупной фракции, доля которой составляет 5% (принято d_{95}), м, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³.</p>
15. В.В. Романовский (1977) [31]	$q_T = 0,01\rho_{гр}d \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \alpha \left(V - V_0\sqrt{\frac{f}{f_0}} \right) \text{ кг/с/м}$ <p>при $10 \leq C \leq 60$ $P = 0,57 + \frac{3,3}{C}$</p> <p>при $C > 60$ $P = 0,0222C - 0,000197C^2$</p> $\alpha = \frac{1,11C \sqrt{1-P(1-\frac{d}{2H})^2}}{C-1}$ – при эллиптическом законе распределении скорости на вертикали $N = \frac{(0,7C + 6)C}{g}$ $\Theta = \frac{d^2}{ab}$ $j = f(\Theta)$ $V_0 = w \sqrt{\frac{jf_0N}{\alpha^2N + jf_0}}$ $w = w(d, \Theta)$ $f_0 = f_0 \left(\Theta, \frac{d}{\Delta} \right)$ $f = f \left(\Theta, \frac{V_d}{V_0} \right)$	<p>$\rho_{гр}$ – среднее значение плотности грунта, слагающего поверхность русла на участке реки, пересекаемом расчетным створом (рекомендуется использовать таблицу Г.А. Петуховой [31]), кг/м³, d – среднее значение диаметра подвижных фракций в составе донных отложений (среднее взвешенное значение), м, H – глубина на вертикали, м, V – средняя скорость потока на вертикали, м/с, V_0 – начальная скорость влечения частиц, м/с, V_d – донная скорость на расстоянии $\frac{d}{2}$ от дна, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с, C – коэффициент Шези, Θ – коэффициент формы частиц (если невозможно его вычислить, принимается равным 0,75), a, b – длина и ширина частицы, N – безразмерный параметр, α – коэффициент перехода от донной скорости к средней на вертикали, f_0 – статический коэффициент</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\frac{d}{\Delta} = 1$	<p>трения, f – динамический коэффициент трения.</p> <p>Рекомендована для расчета транспорта влекомых наносов горных рек, переносящих частицы с $d = 2 \dots 200$ мм (коэффициент 0,01 получен для этих условий).</p>
<p>16. Л.Д. Коган, В.П. Углов (1985) [35]</p>	$q_T = c w d \rho_T \left(\frac{1,35}{k}\right)^2 \left(\frac{V}{k w}\right)^n \text{ кг/с/м}$ <p>$k = \frac{V_0}{w}$ – переменная величина</p> <p>$k = 1,35$ – соответствует нулевой интенсивности отрыва (критическим условиям устойчивости частиц) при турбулентном режиме обтекания частиц ($Re_d = \frac{w d}{\nu} > 300$).</p> <p>$1,35 \leq k \leq 4,5$ – переходный режим обтекания.</p> $S = \frac{V}{k w}$ <p>$S < 2,5$ – транспорт наносов происходит монослоем, $S = 2,5$ – образование гряд, $S = 8$ – режим потока, при котором высота гряд достигает максимального значения, $S > 14,5$ – смыв гряд (транспорт наносов осуществляется в гладкой фазе).</p> <p>при $S < 2,5$ $n = 12, c = 17 * 10^{-8}$, при $2,5 < S < 8,0$ $n = 3, c = 64 * 10^{-4}$, при $S > 8$ $n = 4, c = 78 * 10^{-5}$</p> $w = 2 \sqrt{\left(\frac{bc}{d^2}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right) \frac{V}{F} g}$	<p>V_0 – сдвигающая скорость потока, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с, d – средний диаметр частицы, м, ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м³, k – коэффициент пропорциональности, S – критерий устойчивости частиц, n, c – параметры, V – скорость потока, м/с, a, b, c – длина, высота и ширина частицы, V – объем частицы, F – площадь миделева сечения частицы, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.</p> <p>Рекомендована для частиц с $\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$. Для частиц с меньшей плотностью следует вводить коэффициент, учитывающий влияние плотности в переходной области сопротивления частиц.</p> <p>Получена на основе лабораторных данных разных авторов: В.Н. Гончарова, В.К. Дебольского, Н.С. Знаменской, Ю.М. Корчохи, В.К. Дебольского и др., Н.Н. Гришина и др.</p>

Автор	Формула	Примечания
	$d = \frac{a + b + c}{3}$ <p>w – по В.В. Романовскому [31] (нет данных по b, c, V и F).</p>	
17. Р.К. Кромер (1985) [48]	$q_T = 0,0083\rho_T(V - V_0)d\left(\frac{V}{V_0}\right)^{6,5}\left(\frac{d}{H}\right)^{1,41} \text{ кг/с/м}$ $V_0 = 2,8^4\sqrt{d_{max}H} \text{ – по В.Ф. Талмазе.}$	ρ_T – плотность донных частиц, кг/м ³ , V – скорость потока, м/с, V_0 – неразмывающая скорость, м/с, d – средний диаметр наносов, м, H – средняя глубина потока, м.
18. А.Н. Бутак ов (1998) [7]	<p>1. $q_T = 0,007\left(\frac{v}{\sqrt{g}}\right)^{\frac{1}{3}}\sqrt{d}V_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^3$ м³/с/м – действительна при развитии мезоформ, при $\frac{V}{V_0} > 1,2$, $0,1 \leq d \leq 1$ мм,</p> <p>2. $q_T = 0,00065\left(\frac{v}{\sqrt{g}}\right)^{\frac{1}{3}}\sqrt{d}V_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^4$ м³/с/м – действительна при наличии микроформ и слабом развитии или отсутствии мезоформ, при $\frac{V}{V_0} > 1,2$, $0,1 \leq d \leq 1$ мм,</p> <p>$V_0 = 1,25\sqrt{gd} \lg \frac{8,8H}{d} \text{ – по В.Н. Гончарову (1954)}$</p> $v = \frac{1,78}{10^6(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}$	v – кинематический коэффициент вязкости, м ² /с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр наносов, м, V_0 – неподвижная скорость, м/с, V – скорость потока, м/с, t – температура воды, °С. Формула действительна при $\frac{V}{V_0} > 1,2$ и $0,1 \leq d \leq 1,0$ мм. Получена методом размерностей на основе зависимостей Гончарова, Карасева, Гришанина, Эйнштейна и Брауна.
1.2 – Расход донных наносов в функции расхода воды		
19. А. Шоклич (1934) [147]	$q_T = 7000 \frac{I^{\frac{3}{2}}}{d^2}(q - q_0) \text{ кг/с/м}$ <p>для $\rho_T = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $q_0 = \frac{0,00001944d}{I^{\frac{4}{3}}}$</p>	I – уклон, d – размер частиц, мм, q – расход воды, м ³ /с/м, q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м.
20. А. Шоклич (1943) [147]	$q_T = 2500I^{\frac{3}{2}}(q - q_0) \text{ кг/с/м}$ <p>для $\rho_T = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $q_0 = \frac{0,6d^{\frac{3}{2}}}{I^{\frac{2}{3}}}$</p>	I – уклон, q – расход воды, м ³ /с/м, q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м, d – размер частиц, м.
21. А. Шоклич [1]	$q_T = 222 \frac{I^{\frac{3}{2}}}{d^2}(q - q_0) \text{ кг/с/м}$	I – уклон, d – размер частиц, мм, q – расход воды, м ³ /с/м,

Автор	Формула	Примечания
	$q_0 = \frac{0,01944}{I^{\frac{4}{3}}}$	q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м.
22. Я.А. Никитин (1951) [75]	$q_T = 530I^{2,2}(q - q_0)^2 \text{ кг/с/м}$ $q_0 = 0,1q_{max}$	I – уклон, q – расход воды, м ³ /с/м, q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м, q_{max} – максимально наблюдаемый расход реки, м ³ /с/м. Рекомендуется для $0,0006 \leq I \leq 0,02$, $10 \leq d \leq 80$ мм, $d_{max} \leq 350$ мм. Формула получена по результатам полевых исследований стока донных наносов горных река Средней Азии.
23. А. Шоклич (1962) [88]	$q_T = 2,5 \frac{\rho}{\rho_T} I^{\frac{3}{2}}(q - q_0) \text{ объем/ед.}$ времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м) $q_0 = 0,26 \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)^{\frac{5}{3}} I^{-\frac{7}{6}} \sqrt{d_{40}^3}$	ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м ³ , I – уклон, q – расход воды, м ³ /с/м, q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м, d_{40} – диаметр 40%-ной вероятности, м.
24. Дж.С. Батхурст, В.Х. Граф, Х.Х. Као (1987) [88]	$q_T = 2,5 \frac{\rho}{\rho_T} I^{\frac{3}{2}}(q - q_0) \text{ объем/ед.}$ времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м) $q_0 = 0,21I^{-1,12} \sqrt{gd_{16}^3} \text{ – для}$ определения начала движения смеси. $q_{0i} = 0,15I^{-1,12} \sqrt{gd_i^3} \text{ – для}$ определения начала движения отдельной фракции.	ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м ³ , I – уклон, q – расход воды, м ³ /с/м, q_0 – критический расход начала движения, м ³ /с/м, d_{16} – по поверхностному слою (отмостке), м, d_i – средний размер фракции, м. В работе использованы лабораторные и полевые данные из различных источников. Лотковые данные: $2,9 \leq d_{50} \leq 44,3$ мм, $2490 \leq \rho_T \leq 2760$ кг/м ³ , $0,0025 \leq I \leq 0,20$, $1 \leq q \leq 4600$ л/с, $0,012 \leq 1,09$ м, $0,32 \leq Fr \leq 2,6$, $0 \leq q_T \leq 0,00756$ м ³ /с,

Автор	Формула	Примечания
		<p>ширина лотка 0,2-4 м. Полевые данные: $12 \leq d_{50} \leq 260$ мм, $0,00009 \leq I \leq 0,04$, $0,29 \leq q \leq 4390$ м³/с, $0,012 \leq 1,09$ м, $0,32 \leq Fr \leq 2,6$, $0 \leq q_T \leq 0,0328$ м³/с, ширина русла 2,9-393 м.</p> <p>Это модификация формулы Шоклича для разнородного состава наносов.</p> <p>Рекомендована для расчета критического расхода воды на горных реках для уклонов 0,0025-0,1.</p>
<p>25. Р.Т. Милхауз (1987) [121]</p>	$q_T = 0,07(q - q_0)^2 I^{\frac{3}{2}} \text{ (принято м}^3\text{/с/м)}$ $q_0 = 0,0345I^{-1,12} \sqrt{gd_{50}^3}$	<p>q – расход воды, м³/с/м, q_0 – критический расход начала движения, м³/с/м, I – уклон, d_{50} – диаметр наносов 50%-ной вероятности по поверхностному слою, но может быть взят и по смеси поверхностного и подповерхностного слоев, м.</p>
1.3 – Расход донных наносов в функции касательного напряжения на дне потока		
<p>26. М.П. Дю Буа (1879) [97]</p>	<p>В системе МКГСС.</p> $q_T = K\tau(\tau - \tau_0) \text{ кгс/с/м}$ $K = \frac{0,17}{d^4} \text{ – по Страубу,}$ $\tau_0 = 0,061 + 0,093d \text{ – по Страубу (по результатам экспериментов в малых лабораторных лотках).}$	<p>q_T – весовой расход наносов на единицу ширины русла, кгс/с/м, K – коэффициент, характеризующий наносы, м³/кгс/с, d – диаметр частиц, мм, τ – влекущая сила (касательное напряжение), кгс/м², I – уклон водной поверхности, τ_0 – критическая влекущая сила, кгс/м².</p> <p>Получено по данным экспериментов в лабораторных лотках с малым диапазоном размеров частиц.</p>
<p>27. А.Ф. Шильдс (1936) [97]</p>	$q_T = 10 \frac{(\tau - \tau_0)q\gamma I}{(\gamma_T - \gamma)d\gamma_T} \text{ объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м}^3\text{/с/м)}$	<p>τ – касательное напряжение, Н/м², τ_0 – критическое касательное напряжение, Н/м²,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\frac{\tau_0}{(\gamma_T - \gamma)d} = \theta_0 = f(Re_*)$ $Re_* = \frac{V_* d}{\nu}$ $V_* = \sqrt{gHI}$ $\nu = \frac{1,78}{10^6(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}$	<p>γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³, q – расход воды на единицу ширины русла, м³/с/м, I – уклон, d – диаметр наносов, м, Re_* – критическое число Рейнольдса, V_* – динамическая скорость, м/с, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.</p>
<p>28. Э. Мейер-Петер, Р. Мюллер (1948) [14, 145, 147]</p>	<p>1. Гришанин (1990):</p> $q_T = \frac{8\rho}{(\rho_T - \rho)g} (V_*^2 - V_{*0}^2)^{\frac{3}{2}} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $V_{*0} = 0,22 \sqrt{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)gd}$ <p>2. Янг (1996):</p> $\left(\frac{q_T(\gamma_T - \gamma)}{\gamma_T}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{0,25}{(\gamma_T - \gamma)d} = \frac{\left(\frac{K_s}{K_d}\right)^{\frac{3}{2}} \gamma HI}{(\gamma_T - \gamma)d} - 0,047$ $q_T = \frac{\gamma_T}{(\gamma_T - \gamma)} \left(4d \frac{1}{\sqrt[3]{\rho}} (\gamma_T - \gamma) \left(\frac{\left(\frac{K_s}{K_d}\right)^{\frac{3}{2}} \gamma HI}{(\gamma_T - \gamma)d} - 0,047 \right) \right)^{\frac{3}{2}} \text{ Н}/\text{с}/\text{м}$ $I = \frac{V^2}{K_s^2 H^3}$	<p>ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м³, V_* – динамическая скорость, выражающая действительное напряжение на дне, м/с, V_{*0} – критическая динамическая скорость, м/с, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средневзвешенный диаметр, м, γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³, H – глубина потока, м, I – полный энергетический уклон, I_d – энергетический уклон, вызванный зернистой шероховатостью, V – скорость потока, м/с, d_{90} – диаметр, величину которого не превышает 90% пробы, м, Φ – функция Эйнштейна, θ – безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Формула получена по лабораторным данным для условий плоского дна, слабого транспорта наносов при равновесном состоянии потока для следующих условий:</p>

Автор	Формула	Примечания
	$I_d = \frac{V^2}{K_d^2 H^{\frac{4}{3}}}$ $K_d = \frac{26}{d_{90}^{\frac{1}{6}}}$ <p>$\frac{K_s}{K_d} = 1$ при отсутствии гряд или рифелей</p> <p>$\frac{K_s}{K_d} = 0,5$ при наличии развитых гряд или рифелей</p> <p>3. Вонг, Паркер (2006):</p> $\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}, \quad q_T - \text{объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м}^3/\text{с/м)}$ $\Phi = 8(\theta - 0,047)^{\frac{3}{2}}$ $\theta = \frac{\tau}{(\gamma_T - \gamma)d}$	<p>$0,01 \leq H \leq 1,2$ м, $0,0004 \leq I \leq 0,02$, $0,4 \leq d \leq 30$ мм, $1,25 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 4$.</p>
<p>29. И.В. Егиазаров-1 (1949) [75]</p>	$q_T = KqI^{\frac{3}{2}} \frac{\gamma^2}{(\gamma_T - \gamma)^2} \frac{H}{d} \left(1 - \frac{\theta_0}{\theta}\right) \text{ м}^3/\text{с/м}$ <p>$K = 0,5$ при $\theta_0 = 0,03$, $K = 0,25$ и $0,5$ при $\theta_0 = 0,06$ – при больших числах Рейнольдса.</p>	<p>K – безразмерный коэффициент, q – расход воды на единицу ширины русла, м³/с/м, I – уклон, γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³, H – глубина, м, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Формула получена эмпирическим путем по данным Гилберта и Лапшина.</p>
<p>30. И.В. Егиазаров-2 (1949) [13]</p>	$q_T = 0,015 \frac{\rho}{\rho_T - \rho} q \sqrt{I} \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} \text{ м}^3/\text{с/м}$ $\tau_0 = \frac{1}{\Psi_0} g(\rho_T - \rho)d$	<p>ρ_T, ρ – плотности донных частиц и воды, кг/м³, q – расход воды на единицу ширины русла, м³/с/м,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\frac{1}{\Psi_0} = 0,06$ – для крупных частиц, движение которых не зависит от вязкости воды.	I – уклон, τ – касательное напряжение, Н/м ² , τ_0 – критическое касательное напряжение, Н/м ² , Ψ_0 – критическое значение коэффициента устойчивости, d – средний диаметр донных наносов, м. Формула получена эмпирическим путем по данным Гилберта и Лапшина.
31. И.Я. Орлов (1950) [75]	$q_T = 0,016\rho q \left(\frac{\rho H I}{(\rho_T - \rho)d} - 0,04 \right)^{\frac{3}{2}} \text{ кг/с/м}$	ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м ³ , H – средняя глубина потока, м, q – расход воды на единицу ширины русла, м ³ /с/м, I – уклон, d – средний диаметр донных наносов, м.
32. А.С. Пейнтал (1971) [123]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho} \right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = f(\theta)$ $\theta = \frac{\tau}{(\gamma_T - \gamma)d}$ <p>при $\theta \leq 0,05$ $\Phi = 6,56 * 10^{18} \theta^{16}$</p> <p>при $\theta > 0,05$ $\Phi = 13\theta^{2,5}$</p>	Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м ³ , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, γ – удельный вес воды, Н/м ³ , γ_T – удельный вес наносов, Н/м ³ . Получена по лабораторным данным.
33. К. Ашида, М. Мицуэ (1972) [138]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho} \right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 17(\theta - \theta_0)(\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_0})$ $\theta_0 = 0,05$	Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и

Автор	Формула	Примечания
		<p>наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение.</p>
<p>34. М.С. Ялин (1972) [146]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 0,635s\sqrt{\theta} \left(1 - \frac{\ln(1 + as)}{as}\right)$ $\theta = \frac{\tau}{(\rho_T - \rho)gd}$ $s = \frac{\theta}{\theta_0} - 1$ $a = 2,45 \frac{\sqrt{\theta_0}}{\left(\frac{\rho_T}{\rho}\right)^{0.4}}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение – по Шильдсу, a, s – параметры.</p>
<p>35. Ф. Ингелунд, Дж. Фредзо (1976) [138]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 18,74(\theta - \theta_0)(\sqrt{\theta} - 0,7\sqrt{\theta_0})$ $\theta_0 = 0,05$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение.</p>
<p>36. Л.Р. Фернандез-Лик, Р. Ван Бик</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед.</p>

Автор	Формула	Примечания
(1976) [104]	$\Phi = 5,7(\theta - \theta_0)^{1,5}$ $\theta_0 = 0,037-0,0455$	<p>времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Получена по лабораторным данным.</p> <p>Длина прямоугольного лотка 8 м, ширина 0,1 м, высота 0,2 м. $I = 12^\circ, 18^\circ, 22^\circ$. Грунт: песок ($\rho_T = 2640$ кг/м³, $d = 0,9$ и 1,8 мм), гравий ($\rho_T = 2640$ кг/м³, $d = 3,3$ мм), зерна грецкого ореха ($\rho_T = 1340$ кг/м³, $d = 1,5$ мм), магнетит ($\rho_T = 4580$ кг/м³, $d = 1,8$ мм). $H = 0,08$ м (для гравия и магнетита), $H = 0,12$ м (для остального грунта). Расход донных наносов измерялся только при низких значениях касательного напряжения, в отсутствие рифелей, с относительно низкой интенсивностью турбулентности ($30000 \leq Re \leq 120000$), в то время как у дна турбулентность была довольно существенна ($15 \leq Re_d \leq 165$).</p>
37. Г. Паркер (1979) [138]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = 11,2 \frac{(\theta - 0,03)^{4,5}}{\theta^3}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение.</p>
<p>38. Г.М. Смарт, М.Н. Ягги (1983) [135]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} \frac{V}{V_*} I^{0,6} \sqrt{\theta} (\theta - \theta_0)$ $V_* = \sqrt{gHI}$ $\theta = \frac{1}{\Psi} = \frac{\tau}{(\gamma_T - \gamma)d}$ $\theta_0 = \frac{1}{\Psi_0} = \frac{\tau_0}{(\gamma_T - \gamma)d}$ $\theta_0 = \theta_{\text{по Шильдсу}} \cos \arctan l \left(1 - \frac{l}{\tan \varphi}\right)$ $\varphi = 33^\circ$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, d_{90} – диаметр, величину которого не превышает 90% пробы, м, d_{30} – диаметр, величину которого не превышает 30% пробы, м, d – средний диаметр наносов, м, V – скорость потока, м/с, V_* – динамическая скорость, м/с, θ – безразмерное касательное напряжение (коэффициент подвижности), θ_0 – критическое значение коэффициента подвижности, Ψ – коэффициент устойчивости, Ψ_0 – критическое значение коэффициента устойчивости, φ – угол естественного откоса.</p> <p>Получена по экспериментальным лабораторным данным, в результате собственных экспериментов и массива данных Мейер-Петера и Мюллера для следующих условий: $0,01 \leq H \leq 1,2$ м, $0,0004 \leq I \leq 0,25$, $0,4 \leq d \leq 30$ мм,</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>$5 \leq q \leq 30$ л/с, $0,07 \leq q_T \leq 16,24$ кг/с, $0,1 \leq B \leq 0,2$ м.</p> <p>Рекомендована для расчета максимально возможного расхода донных наносов (транспортирующей способности потока).</p>
<p>39. Л. Ван Рейн (1984) [141]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{g d_{50}^3}}$ $\Phi = \frac{0,053}{d_*^{0,3}} \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_0}\right)^{2,1}$ $d_* = d_{50} \left(\frac{g \frac{\rho_T - \rho}{\rho}}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\theta_0 = 0,24 d_*^{-1} \text{ при } d_* \leq 4$ $\theta_0 = 0,14 d_*^{-0,64} \text{ при } 4 < d_* \leq 10$ $\theta_0 = 0,04 d_*^{-0,1} \text{ при } 10 < d_* \leq 20$ $\theta_0 = 0,013 d_*^{0,29} \text{ при } 20 < d_* \leq 150$ $\theta_0 = 0,055 \text{ при } d_* > 150$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, d_* – безразмерный диаметр донных наносов, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p> <p>Формула выведена для частиц $0,2 \leq d \leq 2$ мм.</p> <p>Проверена на 580 лабораторных и полевых данных.</p>

Автор	Формула	Примечания
40. В. Х. Граф, Л. Сушка (1987) [137]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = 10,4\theta^{1,5} \left(1 - \frac{0,045}{\theta}\right)^{2,5} \quad \text{при } \theta < 0,068$ $\Phi = 10,4\theta^{2,5} \quad \text{при } \theta \geq 0,068$	Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м ³ , $g = 9,81$ м/с ² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.
41. М.Н.Р. Ягги, Дж.Г. Уиттакер (1987) [112]	$q_T = \frac{2,5}{\rho_T} I^{1,5} q \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{1,67}\right) \quad (\text{принято м}^3/\text{с/м})$ $\theta_0 = \theta_{\text{по Шильдсу}} \cos \arctan I \left(1 - \frac{I}{\tan \varphi}\right)$	ρ_T – плотность наносов, кг/м ³ , I – уклон, q – удельный расход воды, м ³ /с/м, θ_0 – критическое безразмерное касательное напряжение, θ – безразмерное касательное напряжение. Не указано, через какой диаметр (d, d_{50} или др.) считать θ .
42. Дж.М. Нельсон (1988) [138]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 12\sqrt{\theta}(\theta - \theta_0)$	Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м ³ /с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м ³ , $g = 9,81$ м/с ² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.

Автор	Формула	Примечания
<p>43. П.Е. Эшмор (1988) [86]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = 3,11(\theta - 0,045)^{1,37}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, соответствует d_{50} pavement, что, по Паркеру, близко к d_{50} донных наносов θ – безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Получена по лабораторным данным моделей типичных горных рек.</p>
<p>44. Г.М. Смарт, Х.С. Лоу (1989) (модификация формулы Г.М. Смарта (1984)) [119]</p>	$q_T = \frac{6,42}{\sqrt{\frac{\rho_T - 1}{\rho}}} (\theta - \theta_0) d V I^{0,6} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $\theta = \frac{\tau}{(\rho_T - \rho)gd}$ $\theta_0 = 0,06$	<p>ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, V – скорость потока, м/с, I – уклон.</p> <p>Это модификация формулы Г.М. Смарта (1984), выполненная Х.С. Лоу для экспериментальных данных по легким заменителям наносов различной плотности.</p> <p>Условия экспериментов: однородные частицы, $d = 3,5$ мм, $1,17 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 2,46$, $0,75 \leq Q \leq 5,5$, $0,0045 \leq q_T \leq 0,03$, $0,0046 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 0,0149$.</p>

Автор	Формула	Примечания
45. П.Л. Уайберг, Дж.Д. Смит (1989) [138]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 9,64\theta^{0,166}(\theta - \theta_0)^{\frac{3}{2}}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p>
46. О.С. Мадсен (1991) [138]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = (\sqrt{\theta} - 0,7\sqrt{\theta_0})(\theta - \theta_0)$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p>
47. Л. Сушка (1991) [137]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = 10,4\theta^{1,5} \left(1 - \frac{\theta_0}{\theta}\right)^{2,5}$ $\theta_0 = 0,0851 \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{-0,266}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>безразмерного касательного напряжения.</p> <p>Лабораторные данные: $3,3 \leq d_{50} \leq 43,5$, $0,0017 \leq I \leq 0,09$, $0,9 \leq \frac{H}{d_{50}} \leq 73,3$, $147 \leq Re_d \leq 14000$.</p>
<p>48. П. Нильсен (1992) [115]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 12\sqrt{\theta}(\theta - \theta_0)$ $\theta_0 = 0,05$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p>
<p>49. Дж. Фредзо, Р. Дейгаард (1992) [138]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = \frac{30}{\pi} (\theta - \theta_0)(\sqrt{\theta} - 0,7\sqrt{\theta_0})$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p>
<p>50. Я. Ниньо, М. Гарсиа (1994) [138]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = \frac{12}{\mu_d} (\sqrt{\theta} - 0,7\sqrt{\theta_0})(\theta - \theta_0)$ $\mu_d = 0,23$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³,</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, μ_d – коэффициент.</p>
<p>51. Р.Л. Солсби (1997) [136]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ $\Phi = \alpha \sqrt{\theta} (\theta - \theta_0)$ <p>$\alpha = 12$ или 8 (второй вариант предложен в статье 2005 г.)</p> $\theta_0 = 0,05$ <p style="text-align: right;">вариант</p>	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, $\text{кг}/\text{м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, α – коэффициент, зависит от таких факторов, как форма, степень окатанности частиц, угол внутреннего трения.</p> <p>Формула выведена для прибрежной морской зоны. Проверялась на данных Мейер-Петера, Гилберта, Уилсона и Дамгаарда и др. $0,21 \leq d \leq 28,65 \text{ мм}$.</p>
<p>52. В.Х. Граф (1998) [138]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 8(\theta - \theta_0)^{1,5}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, $\text{кг}/\text{м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p>
<p>53. Я.С. Рибберинк (1998) [128]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{50}^3}}$ <p>1. $\Phi = 10,4(\theta - \theta_0)^{1,67}$ – для установившихся течений</p> <p>2. $\Phi = 11(\theta - \theta_0)^{1,65}$ – универсальная формула для вдольбереговой зоны</p> $\theta_0 = 0,24d_*^{-1} \text{ при } 1 < d_* < 4$ $\theta_0 = 0,14d_*^{-0,64} \text{ при } 4 < d_* < 10$ $\theta_0 = 0,04d_*^{-0,1} \text{ при } 10 < d_* < 20$ $\theta_0 = 0,013d_*^{0,29} \text{ при } 20 < d_* < 150$ $\theta_0 = 0,055 \text{ при } d_* > 150$ $d_* = d_{50} \left(\frac{g\rho_T - \rho}{\rho v^2}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ – по Л.С. Ван Рейну (1993)}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, d_* – безразмерный диаметр донных наносов, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.</p> <p>Получена по лабораторным и полевым данным автора и других исследований.</p> <p>Данные характеризуются широким диапазоном условий: $\theta_0 < \theta < 10$. Лабораторные данные: $0,19 \leq d_{50} \leq 0,93$. Полевые данные (по рекам): $0,37 \leq d_{50} \leq 3,8$.</p>
<p>54. Р. Ханзикер, М.Н.Р. Ягги (2002) (обобщение формулы Мейер-Петера и Мюллера (1948))</p>	$\Phi_i = \frac{q_{Ti}}{f_i} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_i^3}}$ $\Phi_i = 5 \left(\frac{d_i}{d}\right)^{-\frac{3}{2}} \left(\left(\frac{d_i}{d}\right)^{-\alpha} (\theta - \theta_0)\right)^{\frac{3}{2}}$ $\theta = \frac{\tau}{(\rho_T - \rho)gd}$	<p>Φ_i – безразмерный расход донных наносов для данной фракции, q_{Ti} – удельный расход донных наносов данной фракции, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), f_i – доля фракции грунта (рассматривается только гравий),</p>

Автор	Формула	Примечания
[105]	$\theta_0 = \theta_* \left(\frac{d_{\text{пп}}}{d} \right)^{0,33}$ $\theta_* = 0,05$ $\alpha = 0,011\theta^{-\frac{3}{2}} - 0,3$	<p>ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d_i – характерный диаметр фракции поверхностного слоя, d – средний диаметр поверхностного слоя, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, q_{Ti} – расход донных наносов на единицу ширины русла в объемных единицах, $d_{\text{пп}}$ – средний диаметр подповерхностного слоя, α – параметр.</p>
55. Р. Уилкок, Дж.К. Кроу (2003) [142]	$\Phi_i = q_{Ti} \frac{\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right) g}{p_i V_*^3}$ $\Phi_i = 0,002 \left(\frac{\tau}{\tau_{pi}} \right)^{7,5} \text{ для } \frac{\tau}{\tau_{pi}} < 1,35$ $\Phi_i = 14 \left(1 - \frac{0,894}{\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{pi}}}} \right)^{4,5} \text{ для } \frac{\tau}{\tau_{pi}} \geq 1,35$ $\frac{\tau_{pi}}{\tau_p} = \left(\frac{d_i}{d} \right)^b$ $b = \frac{0,67}{1 + \exp\left(1,5 - \frac{d_i}{d}\right)}$ $\theta_p = \frac{\tau_p}{(\rho_T - \rho)gd}$ $\theta_p = 0,021 + 0,015 \exp(-20p_{\text{п}})$	<p>Φ_i – безразмерный расход донных наносов для данной фракции, q_{Ti} – твердый расход данной фракции на единицу ширины русла, м³/с/м (bed-material load), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, p_i – доля данной фракции в составе смеси, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, V_* – динамическая скорость, τ_p – заменитель критического значения касательного напряжения, τ_{pi} – заменитель критического значения касательного напряжения для данной фракции, d_i – характерный диаметр фракции поверхностного слоя, d – средний диаметр поверхностного слоя, b – коэффициент, $p_{\text{п}}$ – доля песка в составе смеси.</p> <p>Все данные по гранулометрии</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>рекомендовано брать по поверхностному слою дна.</p> <p>Получена по лабораторным данным.</p> <p>Эксперименты проводились с пятью составами смеси наносов, образованными в зависимости от количества песка в них. Число экспериментов 9-10 для каждого состава смеси. Размеры входящего в смеси гравия $2,0 \leq d \leq 64,0$ мм, песка $0,5 \leq d \leq 2,0$ мм. Доля песка в смесях 6,2-34,3%. $0,09 \leq H \leq 0,12$ м, $0,000018 \leq q_T \leq 0,12$ кг/м/с.</p>
<p>56. Б. Каменен, М. Ларсон (2005) [95]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{g d_{50}^3}}$ $\Phi = 12\theta^{1,5} \exp\left(-4,5 \frac{\theta_0}{\theta}\right)$ $\theta_0 = \frac{0,30}{1+1,2d_*} + 0,055(1 - \exp(-0,02d_*))$ <p>– по Солсби</p> $d_* = \sqrt[3]{\frac{Re_* d_{50}^2}{\theta_0}} = d_{50} \sqrt[3]{\frac{g(\rho_T - \rho)}{\nu^2}}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения, d_* – безразмерный диаметр донных наносов, ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.</p> <p>Для вывода формулы использованы лабораторные и натурные данные различных исследователей (1914-1999 гг.). Взяты только те данные, в которых донные формы не наблюдались. В опытах спользованы песок, пластик, гравий, бакелит и нейлон.</p>

Автор	Формула	Примечания
		$1,14 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 2,67, 0,84 \leq d_{50} \leq 200 \text{ мм.}$
<p>57. А.Д. Абрахамс, П. Гао (2006) [83]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = \theta^{1,5} \left(1 - \frac{\theta_0}{\theta}\right)^{3,4} \frac{V}{V_*}$ <p>$\theta_0 = 0,04$ – получено экспериментальным данным</p>	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения. V – средняя скорость потока, м/с, V_* – динамическая скорость.</p> <p>Получена по лабораторным данным разных авторов. Всего 322 экспериментов.</p> <p>Формула не предназначена для расчета расхода донных наносов в естественных потоках.</p> <p>Формула подходит для использования как в условиях сальтации частиц, так и для гладкого движения. Длина лотков 3,7-16,8 м, ширина 0,1-0,6 м. $0,281 \leq V \leq 2,750 \text{ м/с}$, $0,004 \leq H \leq 0,201 \text{ м}$, $8871 \leq Re \leq 1236641$, $32 \leq Re_{3d} \leq 4483$, $3d$ – высота шероховатости, $0,5 \leq Fr \leq 3,9$, $0,001 \leq I \leq 0,293$, $0,00051 \leq d \leq 0,0235 \text{ м}$, $0,033 \leq \theta \leq 1,83$.</p> <p>$\theta_0$ в части массива данных определялось путем экстраполяции кривой q_T до</p>

Автор	Формула	Примечания
		нуля, в оставшейся части θ_0 было принято равным 0,04, так в силу очень больших значений q_T экстраполяция была невозможна.
<p>58. М. Вонг, Г. Паркер (2006) (редакция формулы Мейер-Петера и Мюллера) [145]</p>	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 4,93(\theta - 0,047)^{1,6}$ $\Phi = 3,97(\theta - 0,0495)^{1,5}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Выведена на основе лабораторных данных, использованных Мейер-Петером и Мюллером для вывода их формул 1934 и 1948 гг.</p> <p>Формула получена для условий плоского дна, слабого транспорта однородных наносов при равновесном состоянии потока.</p> <p>Данные Цюрихской лаборатории: однородные наносы, плоское дно (52 опыта ($d = 28,65$ мм, $d = 5,21$ мм, d – средний арифметический диаметр частиц, $\frac{\rho_T}{\rho} - 1 = 1,68$).</p> <p>Данные Гилберта: однородные наносы, плоское дно (116 опытов ($d = 7,01$ мм, $d = 4,94$ мм и $d = 3,17$ мм d – средний арифметический диаметр частиц, $\frac{\rho_T}{\rho} - 1 = 1,65$).</p>

Автор	Формула	Примечания
59. М.Г. Клейнханс, Б.Т. Грасмейер (2006) [115]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{g d_{50}^3}}$ $\Phi = (\theta - \theta_0)^{1,5}$ $\theta_0 = 0,05 \text{ или по Шильдсу}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d_{50} – медианный диаметр донных наносов, м, θ – безразмерное касательное напряжение, θ_0 – критическое значение безразмерного касательного напряжения.</p> <p>Получена из натуральных данных по прибрежной полосе голландского побережья Северного моря.</p> <p>Характеристика участка, на котором велись измерения: $13 \leq H \leq 18 \text{ м}$, $0,160 \leq d_{10} \leq 0,244 \text{ мм}$, $0,216 \leq d_{50} \leq 0,280 \text{ мм}$, $0,288 \leq d_{900} \leq 0,347 \text{ мм}$.</p>
1.4 – Расход донных наносов в функции энергетического уклона		
60. Г.М. Смарт (1984) [134]	$q_T = 4,2qI^{0,6} \frac{I-I_0}{\gamma_T - 1} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $I_0 = \frac{\left(\frac{\gamma_T}{\gamma} - 1\right) d}{20H}$	<p>q – удельный расход воды, м³/с/м, I – уклон, I_0 – энергетический уклон для условий, когда наносы не движутся, γ – удельный вес воды, Н/м³, γ_T – удельный вес наносов, Н/м³, d – средний диаметр донных отложений, м, H – глубина, м</p> <p>Отмечается, что формула для максимально возможного расхода донных наносов (транспортирующей способности).</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>Получена по лабораторным данным.</p> <p>Рекомендуемая область применения: $d \geq 0,04$ мм, естественно окатанный аллювий, $I \leq 0,2$, полностью развитый турбулентный режим. Для $I \leq 0,005$ точность может уменьшиться.</p> <p>Проверена на натуральных данных.</p>
2 – Расход донных наносов как вероятностная характеристика		
<p>61. Х.А. Эйнштейн (1942) [102]</p>	$\Phi = q_T \frac{1}{F} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{35}^3}}$ $\Phi = \frac{1}{0,465} \exp(-0,391\Psi)$ $\Psi = \frac{(\gamma_T - \gamma)d_{35}}{\tau} = \frac{1}{\theta}$ $w = F \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd_{35}}$ $F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\mu^2}{gd_{35}^3 \rho(\rho_T - \rho)}} - \sqrt{\frac{36\mu^2}{gd_{35}^3 \rho(\rho_T - \rho)}}$ $\mu = \frac{1,78 * 1000}{10^6(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), F – коэффициент, ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{35} – диаметр донных отложений, вероятностью 35%, м, Ψ – коэффициент устойчивости, γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, Н/м³, θ – безразмерное касательное напряжение, μ – динамический коэффициент вязкости, кг/м/с, t – температура воды, °С.</p> <p>Формула выведена теоретически, а ее конечный вид получен по лабораторным данным Гилберта и Мейер-Петера.</p> <p>Справедлива для однородных наносов и смесей, ведущих себя как однородные наносы (когда состав донных отложений и наносов</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>одинаков, и соответствующие характерные диаметры также одинаковы).</p> <p>Формула получена для $0,018 \leq H \leq 1,1$ м, $0,315 \leq d \leq 28,65$ мм, $1,25 \leq \frac{\gamma_T}{\gamma} \leq 4,22$.</p>
<p>62. Х.А. Эйнштейн (1942) (интерпретация К.В. Гришанин а) [15]</p>	$\Phi = q_T \frac{1}{F} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 2,17 \exp(-0,39\Psi)$ $\Psi = \frac{(\gamma_T - \gamma)d}{\tau} = \frac{1}{\theta}$ $w = F \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd}$ $F = \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} = 1,2 - \text{по И.И. Леви.}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, м³/с/м, F – коэффициент, ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных отложений, м, Ψ – коэффициент устойчивости, γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, Н/м³, τ – касательное напряжение, Н/м², θ – безразмерное касательное напряжение, w – гидравлическая крупность, м/с, c_1 – первый коэффициент формы частицы, c_2 – второй коэффициент формы частицы.</p>
<p>63. Х.А. Эйнштейн (1950) (интерпретация К.В. Гришанин а) [15]</p>	$q_T = \frac{dw}{A_*} \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{B_* \Psi - 1}{\sqrt{2}\eta_0}\right)}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{B_* \Psi - 1}{\sqrt{2}\eta_0}\right)} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $\Psi = \frac{(\gamma_T - \gamma)d}{\tau} = \frac{1}{\theta}$ $w = F \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd}$ $F = \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} = 1,2 - \text{по И.И. Леви.}$ $A_* = 43,5$ $B_* = 0,07$	<p>d – средний диаметр донных отложений, м, w – гидравлическая крупность, м/с, A_*, B_* – эмпирические постоянные, Ψ – коэффициент устойчивости, η_0 – пульсационная составляющая подъемной силы, γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, Н/м³, τ – касательное напряжение, Н/м², θ – безразмерное касательное напряжение,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$\eta_0 = 0,5$	<p>F – коэффициент, ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, c_1 – первый коэффициент формы частицы, c_2 – второй коэффициент формы частицы.</p>
<p>64. К.Б. Браун (1950) (модификация формулы Эйнштейна 1942 г.) [93]</p>	$\Phi = q_T \frac{1}{F} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd_{35}^3}}$ $\Phi = 40 \left(\frac{1}{\Psi}\right)^3$ $\Psi = \frac{(\gamma_T - \gamma)d_{35}}{\tau} = \frac{1}{\theta}$ $w = F \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd_{35}}$ $F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\mu^2}{gd_{35}^3 \rho(\rho_T - \rho)}} - \sqrt{\frac{36\mu^2}{gd_{35}^3 \rho(\rho_T - \rho)}}$ $\mu = \frac{1,78 * 1000}{10^6(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), F – коэффициент, ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d_{35} – диаметр донных отложений, вероятностью 35%, м, Ψ – коэффициент устойчивости, γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, Н/м³, τ – касательное напряжение, Н/м², θ – безразмерное касательное напряжение, w – гидравлическая крупность, м/с, μ – динамический коэффициент вязкости, кг/м/с, t – температура воды, °С.</p> <p>Формула выведена теоретически.</p> <p>Получена по лабораторным данным Гилберта и Мейер-Петера.</p> <p>Формула предназначена для однородных наносов и смесей, ведущих себя как однородные наносы.</p>

Автор	Формула	Примечания
		<p>Формула получена для условий: $0,018 \leq H \leq 1,1$ м, $0,315 \leq d \leq 28,65$ мм, $1,25 \leq \frac{\gamma_T}{\gamma} \leq 4,22$.</p> <p>Рекомендуется для более активного транспорта наносов, чем формула Эйнштейна 1942 г.</p>
3 – Принцип равной подвижности		
<p>65. Г. Паркер (1982) [147]</p>	$\Phi_i^* = q_{Ti} \frac{\left(\frac{\gamma_T}{\gamma} - 1\right)}{p_i \sqrt{g H I}} \frac{1}{H}$ $\Phi_i^* = f(\theta^*_i)$ $\theta^*_i = \frac{H I}{\left(\frac{\gamma_T}{\gamma} - 1\right) d_i \tau^*_i}$ $\tau^*_i = 0,0875 \frac{d_{50}}{d_i}$ <p>Ввиду одинаковой подвижности наносов всех фракций для расчета q_T рекомендуется использовать d_{50}:</p> <p>при $0,95 < \theta^*_{50} < 1,65$</p> $\Phi^* = 0,0025 \exp(14,2(\theta^*_{50} - 1) - 9,28(\theta^*_{50} - 1)^2)$ <p>при $\theta^*_{50} > 1,65$</p> $\Phi^* = 11,2 \left(1 - \frac{0,822}{\theta^*_{50}}\right)^{4,5}$	<p>Φ_i^* – безразмерная функция транспорта донных наносов, q_{Ti} – расход донных наносов данной фракции на единицу ширины русла, (принято $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$), γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, $\text{Н}/\text{м}^3$, p_i – доля по весу наносов данной фракции, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина, м, I – уклон, θ^*_i – безразмерное касательное напряжение данной фракции, τ^*_i – коэффициент, d_i – средний диаметр данной фракции, м, d_{50} – медианный диаметр, м, θ^*_{50} – безразмерное касательное напряжение для d_{50}.</p> <p>Формула получена на основе натуральных данных по нескольким ручьям с донными отложениями крупностью $18 < d_{50} < 28$ мм.</p> <p>Рекомендована для крупных наносов.</p>
4 – Регрессионные зависимости		
<p>66. Батука, Десон [1]</p>	$q_T = 12,25 * 10^{-6} q^2 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	<p>q – удельный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$.</p>

Автор	Формула	Примечания
67. П.И. Жюльен-1 [138]	$\Phi = q_{\tau} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_{\tau} - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 2,15 \exp\left(-\frac{0,391}{\theta}\right) \text{ при } \theta < 0,18$ $\Phi = 40\theta^3 \text{ при } 0,18 \leq \theta \leq 0,52$ $\Phi = 15\theta^{1,5} \text{ при } \theta > 0,52$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_{τ} – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_{τ} – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных отложений, м, θ – безразмерное касательное напряжение.</p>
68. П.И. Жюльен-2 [138]	$\Phi = q_{\tau} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_{\tau} - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 18\sqrt{gd^3}\theta^2 \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_{\tau} - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $q_{\tau} = 18\sqrt{gd^3}\theta^2$	<p>Φ – безразмерный расход донных наносов, q_{τ} – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_{τ} – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных отложений, м, θ – безразмерное касательное напряжение.</p>
69. Кирг. НИИВХ [1]	$q_{\tau} = 0,017 \left(\frac{Fr}{\theta}\right)^2 q \text{ кг/с/м}$ $\theta = \frac{\tau}{(\gamma_{\tau} - \gamma)d}$ $Fr = \frac{V^2}{gH}$	<p>Fr – число Фруда, θ – безразмерное касательное напряжение, q – удельный расход воды, м³/с/м, τ – касательное напряжение, Н/м², γ, γ_{τ} – удельный вес воды и наносов, Н/м³, d – средний диаметр донных отложений, м, V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м.</p>
70. А.Н. Крошкин, Г.В. Калиниченко (1983) [49]	$q_{\tau} = q\mu \text{ кг/с/м}$ $\mu = k\rho_{\tau} \left(\frac{Fr}{\theta}\right)^2$	<p>q – удельный расход воды, м³/с/м, μ – концентрация донных наносов, г/л, k – безразмерный коэффициент,</p>

Автор	Формула	Примечания
	$Fr = \frac{V^2}{gH}$ $k\rho_T = 0,017$ $\theta = \frac{HI}{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} d_{max}}$	<p>$\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$ – плотность наносов, Fr – число Фруда, θ – коэффициент сопротивления подвижного русла, определяемый по формуле Егизарова, V – скорость потока, м/с, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, ρ – плотность воды, кг/м^3, d_{max} – максимальный диаметр донных наносов, м.</p> <p>Получена по данным аналитических и экспериментальных исследований.</p> <p>Рекомендована для $Fr = 0,3 \dots 2$, для безрядовой формы транспорта влекомых наносов.</p>
71. А.Ф. Кудряшов [1]	$q_T = 0,078 \frac{V^4}{H^2} q \text{ кг/с/м}$	V – скорость потока, м/с, H – глубина потока, м, q – удельный расход воды, $\text{м}^3/\text{с/м}$.
72. Педраш [1]	$q_T = 7,63\tau^{\frac{8}{5}}d^{\frac{1}{5}} - 0,075 \text{ кг/с/м}$	τ – касательное напряжение, Н/м^2 , d – средний диаметр донных отложений, м.
73. Б.В. Поляков [1]	$q_T = 0,1585V^4 \text{ кг/с/м}$	V – скорость потока, м/с.
74. С. Саго, Х. Киккава [24]	$q_T = 3,673q \frac{HI}{d} \frac{I^{\frac{3}{2}}}{Fr} \text{ кг/м/с}$	q – удельный расход воды, кг/с/м , H – глубина потока, м, I – уклон, d – средний диаметр донных отложений, м, Fr – число Фруда.
75. Чин [1]	$q_T = \frac{\Phi}{0,00029 \sqrt{\frac{1}{gd}}} \text{ кг/с/м}$ $\Phi = \left(\frac{V}{\Psi} - 0,188 \right)^{\frac{3}{2}}$	Φ – параметр, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных отложений, м, V – скорость потока, м/с, Ψ – коэффициент

Автор	Формула	Примечания
	$\psi = \frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma} \frac{d}{HI}$	<p>устойчивости, γ, γ_T – удельный вес воды и наносов, Н/м³, H – глубина потока, м, I – уклон.</p>
<p>76. Э. Мейер-Петер (1934) [145]</p>	$q_T = \sqrt{\left(\frac{5}{2} d \left(\frac{q^{2/3} I}{d} - 17\right)\right)^3} \text{ кг/с/м}$	<p>d – размер частиц (для неоднородной смеси d должно быть заменено на d_{35}, для которого 35% смеси тоньше, чем d_{35}), м, q – расход воды, кг/с/м, I – уклон.</p> <p>Формула получена из следующих данных. Данные Цюрихской лаборатории: однородные наносы, плоское дно (52 опыта ($d = 28,65$ мм, $d = 5,21$ мм, d – средний арифметический диаметр частиц, $\frac{\rho_T}{\rho} - 1 = 1,68$)). Данные Гилберта: однородные наносы, плоское дно (116 опытов ($d = 7,01$ мм, $d = 4,94$ мм и $d = 3,17$ мм d – средний арифметический диаметр частиц, $\frac{\rho_T}{\rho} - 1 = 1,65$)).</p> <p>Константы 17 и 0,4 действительны только для песка с удельным весом 2650 кг/м³.</p> <p>Формула получена для условий безгрядового дна, слабого транспорта однородных наносов при равновесном состоянии потока.</p>
<p>77. Дж. Ротгнер (1959) [85]</p>	$q_T = \rho_T \sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho}} g H^3 \left(\frac{V}{\sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} g H}} \left(0,667 \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,14 \right) - 0,778 \left(\frac{d_{50}}{H} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^3 \text{ масса/ед.}$	<p>ρ_T – плотность наносов, кг/м³, ρ – плотность воды, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с, d_{50} – медианный диаметр, м.</p>

Автор	Формула	Примечания
	времени/ед. ширины потока (принято кг/с/м)	Получена по лабораторным данным.
78. А.Ю. Умаров (1965) [29]	$q_T = 0,125\gamma HV\sqrt{I}\left(0,4\frac{V^2}{\frac{\rho_T-\rho}{\rho}gd} - 1\right) \text{ кг/с/м}$	<p>γ – удельный вес воды, Н/м², H – средняя глубина, м, V – скорость потока, м/с, I – уклон водной поверхности, ρ – плотность воды, ρ_T – плотность наносов, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных наносов, м.</p> <p>Получена на основе данных натуральных и лабораторных исследований.</p> <p>Рекомендована для $d > 2$, $\frac{H}{\Delta} \leq 15$, $S > 0,01$, Δ – высота выступов шероховатости русла.</p>
79. Р.Г. Вафин (1970) [8]	$q_T = 0,6I^{0,6}(VH)^{0,8} \text{ Т/м/с}$	I – уклон, V – скорость потока, м/с, H – средняя глубина, м.
80. Н.В. Рухадзе (1985) [69]	<ol style="list-style-type: none"> 1. $q_T = 0,008(1 + \varphi)V^{5,14} \text{ кг/с/м}$ 2. $q_T = 0,015(1 + \varphi)\frac{V^{3,44}}{\Psi^{0,34}} \text{ кг/с/м}$ 3. $q_T = 0,14(1 + \varphi)\frac{(HV)^{2,4}}{d^{0,15}} \text{ кг/с/м}$ 4. $q_T = 0,003(1 + \varphi)\frac{V^{3,6}}{\Psi^{0,13}\alpha^{0,32}} \text{ кг/с/м}$ 5. $q_T = 0,02(1 + \varphi)\frac{V^3}{\left(\frac{d_{max}}{d}-1\right)\Psi^{0,6}} \text{ кг/с/м}$ $\Psi = \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)\frac{d}{HI}$ $\alpha = \frac{d}{H}$ <p>При $0,15 \leq d \leq 0,5 \text{ мм}$ $\varphi = 2,25$, при $0,5 \leq d \leq 1,5 \text{ мм}$ $\varphi = 1,23$, при $d > 1,5 \text{ мм}$ $\varphi = 1,0$.</p>	<p>φ – параметр турбулентности (по В.Н. Гончарову), V – средняя по сечению скорость потока, м/с, Ψ – критерий Лохтина, коэффициент устойчивости, H – глубина потока, м d – характерный (средний) диаметр донных отложений, м, α – множитель Архимеда, d_{max} – максимальный диаметр донных отложений, м ρ_T – плотность наносов, кг/м³, ρ – плотность воды, кг/м³, I – уклон.</p> <p>Получена по натурным данным по горным рекам с $0,38 \leq H \leq 1,47 \text{ м}$, $0,0053 \leq I \leq 0,0104$, $d \leq 0,043 \text{ м}$, а также данных И.В. Боголюбовой (р. Мзымта) и О.И. Халатяна (р.</p>

Автор	Формула	Примечания
81. К.С. Уилсон (1987) [144]	$\Phi = q_T \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}}$ $\Phi = 11,8\theta^{1,5}$	<p>Цхенисцкали).</p> <p>q_T – удельный расход донных наносов, объем/ед. времени/ед. ширины потока (принято м³/с/м), ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, d – средний диаметр донных отложений, м, θ – безразмерное касательное напряжение.</p> <p>Формула выведена для $\theta \geq 1$. Проверялась на лабораторных данных (песок). θ_0 отсутствует, т.к. оно слишком мало для величин θ, характерных для верхнего плоского потока. Коэффициент (11,8) непостоянен и зависит от соотношения $\frac{l}{\rho_T - 1}$. Для небольших уклонов и песка дает хорошие результаты (по данным авторов).</p>
82. Х.С. Лоу (1989) [119]	$q_T = 110 \frac{V_*^6}{w^5} d \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $w = F \sqrt{gd \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)}$ $F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3 \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3 \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)}}$ <p>В расчетах гидравлической крупности w значения F рассчитывались по формуле В.В. Руби (1933), использовалось значение $F = 1,2$, экспериментально полученное Х.С. Лоу, и третий вариант: w – по В.В. Романовскому [31].</p>	<p>V_* – динамическая скорость, м/с, w – гидравлическая крупность, м/с, d – диаметр наносов, м, F – коэффициент, $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения, ρ, ρ_T – плотность воды и наносов, кг/м³, v – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.</p> <p>Получена по лабораторным данным экспериментов с заменителями наносов различной плотности.</p> <p>Условия экспериментов: однородные частицы, $d = 3,5$</p>

Автор	Формула	Примечания
	$v = \frac{1,78}{10^6(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}$	мм, $1,17 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 2,46$, $0,75 \leq Q \leq 5,5$, $0,0045 \leq q_T \leq 0,03$, $0,0046 \leq \frac{\rho_T}{\rho} \leq 0,0149$.
83. К.В. Гришанин (1990) [1, 7]	$q_T = 5 * 10^{-5} HV^3 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	H – глубина потока, м, V – скорость потока, м/с.
84. Н.С. Знаменская, И.Н. Клейн (1992) [24]	$q_T = 0,01q \left(\frac{HI}{d}\right)^2 Fr^4 \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$	q – расход воды, кг/с/м, H – глубина потока, м, I – уклон, d – средний диаметр донных наносов, м, Fr – число Фруда.

Таблица А.5 – Региональные и локальные формулы для расчета расхода донных наносов в реках (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
1. Г.В. Лопатин (1937) [53]	$q_T = \frac{1,4 * 10^3 I^{\frac{4}{3}} (V - V_0)}{\sqrt[3]{d}} \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$	Получена для песчаных наносов по материалам измерений на реках Волге, Мологе, Дону, Луге и Кемке.
2. И.Л. Розовский, В.А. Базилевич, Е.В. Еременко (1967) [65]	$q_T = 0,8 * 10^{-5} V^4 \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$	Для р. Днепр в нижнем бьефе Каневской ГЭС.
3. Л.Г. Гвелесиани, Н.П. Шмальцель (1968) [10]	<p>для р. Куры</p> $Q_T = 0,017(Q - 40) \text{ кг}/\text{с}$ $Q_T = 0,00001(Q - 40) \text{ м}^3/\text{с}$ $Q_T = 0,104(Q - 168) \text{ кг}/\text{с}$ $Q_T = 0,000057(Q - 168) \text{ м}^3/\text{с}$ <p>Для р. Арагвы</p> $Q_T = 0,2(Q - 15) \text{ кг}/\text{с}$ $Q_T = 0,0001(Q - 15) \text{ м}^3/\text{с}$ $Q_T = 1,14(Q - 70) \text{ кг}/\text{с}$ $Q_T = 0,00063(Q - 70) \text{ м}^3/\text{с}$	<p>Для условий начала и ограниченного транспорта донных наносов: $40 < Q < 168 \text{ м}^3/\text{с}$.</p> <p>Для условий полной подвижности всех фракций донных наносов: $Q > 168 \text{ м}^3/\text{с}$.</p> <p>Для условий $15 < Q < 70 \text{ м}^3/\text{с}$.</p> <p>Для условий $Q > 70 \text{ м}^3/\text{с}$.</p> <p>Использованы данные измерений батометрами. Расхода донных наносов включает «придонные»</p>

Автор	Формула	Примечания
		наносы крупностью 0,20-1,00 мм.
4. К.В. Гришанин (1969) [13]	$q_T = 0,015 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 d(V - V_0) \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} 0,96\sqrt{gd}^{0,2} (d + 0,0014)^{0,3} \left(\frac{H}{d}\right)^{0,2} - \text{ по Гончарову}$	Для одного из перекатов Нижней Волги и перекатов крупных равнинных рек ($d = 0,2 \dots 0,7$ мм). d – в метрах.
5. С.Г. Рустамов, С.А. Ахундов (1970) [68]	$Q_T = 6,22Q^{3,5} \text{ г}/\text{м}^3$ $Q_T = 0,22Q^{2,36} \text{ г}/\text{м}^3$	Для р. Дамирапаранчай, с. Куткашен, $\bar{Q} = 3,05 \text{ м}^3/\text{с}$, $I = 0,035$, $d = 10,7$ см. Для р. Тарпанчай, с. Савальян, $\bar{Q} = 15,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $I = 0,009$, $d = 4,0$ см.
6. Р.В. Тимирова, З.А. Классен (1970) (модификация формулы Я.А. Никитина (1951)) [77]	$q_T = \frac{7\rho_*I^{3,2}}{\sqrt{gd_{max}^{2,5}}} (q - q_0)^2 \left(\frac{q_0}{q}\right)^{0,25} \text{ кг}/\text{с}/\text{м}$ $q_0 = \frac{V_0^5}{2,4^5 g^2 I^2}$ $V_0 = 3,7 \frac{d_0^{0,35}}{I^{0,04}}$ $d_0 = 1,25 \sqrt{\frac{q_{max} I^{2,5}}{d_{max}^{0,5}}}$	Для горно-предгорных рек Средней Азии с уклонами 0,004-0,04. ρ_* – объемный вес воды, d_{max} – максимальный диаметр донных отложений, q_0 – критический расход воды, соответствующий началу движения наносов, V_0 – скорость начала подвижки максимальной фракции при q_0 , d_0 – максимальный диаметр фракции, движущейся при q_0 , q_{max} – максимальный наблюдаемый расход воды в реке. Измерения проведены батометром .
7. Я. Богарди (1974) [90]	$Q_T = 3,4 * 10^{-7} Q^{2,245} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 1,9 * 10^{-23} Q^{6,67} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 7 * 10^{-14} Q^{4,167} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 7 * 10^{-14} Q^{4,167} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 1,32 * 10^{-8} Q^{2,245} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 2,64 * 10^{-8} Q^{2,245} \text{ килопонд}/\text{с}$ $Q_T = 2,35 * 10^{-8} Q^{2,245} \text{ килопонд}/\text{с}$	Для рек Венгрии. Для р. Дунай (Dunaremete). р. Дунай (Nagybajcs). р. Дунай (Dunaalmas). р. Дунай (Nagyvaros). р. Дунай (Dunaujvaros). р. Дунай (Fajsz). р. Дунай (Baja).

Автор	Формула	Примечания
	$Q_T = 30 * 10^{-10} Q^{2,74}$ килопонд/с $Q_T = 45 * 10^{-10} Q^{2,74}$ килопонд/с $Q_T = 8 * 10^{-10} Q^{2,74}$ килопонд/с $Q_T = 15 * 10^{-10} Q^{2,74}$ килопонд/с $Q_T = 10^{-6} Q^{2,76}$ килопонд/с $Q_T = 2,15 * 10^{-7} Q^{2,58}$ килопонд/с $Q_T = 5,2 * 10^{-7} Q^{3,28}$ килопонд/с $Q_T = 1,7 * 10^{-6} Q^{2,66}$ килопонд/с $Q_T = 0,9 * 10^{-6} Q^{2,66}$ килопонд/с $Q_T = 5,4 * 10^{-6} Q^{2,66}$ килопонд/с	<p>р. Тисса (Polgar).</p> <p>р. Тисса (Tiszabo).</p> <p>р. Тисса (Tape).</p> <p>р. Тисса (Szeged).</p> <p>р. Raba (Szentgotthard).</p> <p>р. Raba (Kormend).</p> <p>р. Sajó (Kazincbarcika).</p> <p>р. Hernad (Hidasnemeti).</p> <p>р. Hernad (Pere).</p> <p>р. Hernad (Gesztely).</p> <p>Измерения проведены батометром.</p>
8. В.Е. Тузов (1975) [29]	$Q_T = 0,00002 \frac{\gamma_r HQ}{d \sqrt{Fr}}$ кг/с $Fr = \frac{V^2}{gH}$	Для р. Вахша.
9. Д. Жау, Д. Лиу, Х. Гао (1981) [148]	$Q_T = 17,58V$ при $V = 0,65 \dots 0,80$ м/с $Q_T = 4,42V$ при $V = 0,80 \dots 3,0$ м/с	<p>Для р. Янцзы.</p> <p>Измерения проведены батометром.</p>
10. М.А. Эстеп, Р.Л. Бешта (1985) [103]	<p>Для частиц $d \geq 0,25$ мм:</p> <p>Трэп Бей Крик Перекат ($F = 13,5 \text{ км}^2$) $Q_T = 23Q^{1,61}$ кг/час (1981)</p> <p>Флинн Крик Участок 1 ($F = 2,18 \text{ км}^2$) $Q_T = 12,6Q^{4,51}$ кг/час (1978) Участок 1 ($F = 2,18 \text{ км}^2$) $Q_T = 30,6Q^{4,13}$ кг/час (1979) Участок 1 ($F = 2,18 \text{ км}^2$) $Q_T = 2,9Q^{-1,22}$ кг/час (1980) Перекат ($F = 2,05 \text{ км}^2$) $Q_T = 262,7Q^{2,46}$ кг/час (1979) Скальный участок ($F = 1,51 \text{ км}^2$) $Q_T = 60,6Q^{1,98}$ кг/час (1979)</p> <p>Для частиц $d \geq 2$ мм:</p>	<p>Трэп Бей Крик – южная Аляска, Флинн Крик – западный Орегон. Q – в м³/с.</p>

Автор	Формула	Примечания
	<p>Трэп Бей Крик Перекал ($F = 13,5 \text{ км}^2$) $Q_T = 10Q^{1,72}$ кг/час (1981)</p> <p>Флинн Крик Участок 1 ($F = 2,18 \text{ км}^2$) $Q_T = 2,2Q^{5,27}$ кг/час (1979)</p> <p>Перекал ($F = 2,05 \text{ км}^2$) $Q_T = 115,7Q^{2,64}$ кг/час (1979)</p>	
11. Ш.В. Джаошвил и (1986) [19]	<p>Для рек Черноморского побережья Грузии</p> <p>$Q_T = 0,082Q^{0,93}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,03Q^{0,93}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,021Q^{0,93}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,024Q^{0,78}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,043Q^{0,78}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,00002Q^{2,38}$ кг/с</p> <p>$Q_T = 0,045Q^{0,91}$ кг/с</p>	<p>Район от р. Мзымты до р. Бзыби.</p> <p>От р. Бзыби до р. Кодори.</p> <p>От р. Кодори до р. Супса.</p> <p>От р. Натанеби до р. Кинтриши.</p> <p>От р. Дехвы до р. Барцханы.</p> <p>Р. Бзыбь.</p> <p>Р. Кодори.</p> <p>Измерения проведены батометром.</p>
12. Д. Рикенманн (1990) [129]	$Q_T = A(Q - Q_0)^\alpha I^\beta \text{ м}^3/\text{мин}$ $A = \left(12,6 \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)\right)^{1,6} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2}$ $\alpha = 1$ $\beta = 2$ $\frac{d_{90}}{d_{30}} = 1,05$	<p>Формула получена в лабораторных условиях при $I = 0,05 \dots 0,20$ и проверена на горной р. Эрленбах (Центральная Швейцария).</p>
13. В.В. Ромашин (1990) [33]	$Q_T = 11232 \frac{\rho}{\rho_T} I \frac{(Q - Q_0)^{1,2}}{Q_0^{0,2}} \text{ м}^3/\text{сут.}$ $q_0 = 0,067 \sqrt{g} \left(\frac{d_{50}}{I}\right)^{2,5} \text{ м}^3/\text{с}$	<p>Для рек горно-предгорной зоны Черноморского побережья Кавказа, в пределах Краснодарского края, при руслоформирующем расходе воды $73-766 \text{ м}^3/\text{с}$, $0,004 \leq I \leq 0,028$, $0,013 \leq d \leq 0,058 \text{ м}$.</p> <p>$Q$ – в $\text{м}^3/\text{с}$.</p>
14. Б. Дройж, У. Никодемус, Х.	$Q_T = 2,375 * 10^{-6} (Q - 423)^{2,050} \text{ кг/с}$	<p>Для р. Рейн (Вормз, 444,4 км от устья).</p> <p>Q – в $\text{м}^3/\text{с}$.</p>

Автор	Формула	Примечания
Шеммер (1992) [100]		Измерения проведены батометром .
15. Хуанг Дж. (1992) [111]	$Q_T = 25,5V^4$ т/день V – в м/с.	Для малой реки Шен-Шуй в Центральном Китае. Для меженного режима. $V = 0,26 \dots 1,19$ м/с, $H = 0,08 \dots 1,34$ м, $d = 0,2 \dots 7,0$ мм. Формула для грядового движения донных наносов.
16. А. Швидченк о, З.Д. Копалиани (1997) [33]	$q_T = 2,3 * 10^{-9} Q^{2,9}$ м ³ /с	Для р. Лабы у п. Мостовского. Измерения проведены объемным методом .
17. К. Холубова (2000) [110]	$Q_T = 5,72 * 10^{-6} Q^{1,9}$ кг/с	Для р. Дунай (Словения). Измерения производились тремя видами батометров . Q – в м ³ /с.
18. Дж.Дж. Барри, Дж. М. Баффингтон, Дж.Г. Кинг (2004) [87]	$q_T = 4,1 * 10^{-8} Q^{2,81}$ кг/с/м	Для р. Бойз (Boise).
19. В.Н. Морозов, В.А. Ковалев (2004) [54]	$Q_T = 0,0119Q - 25,8$ кг/с	Для устья р. Дунай. Q – в м ³ /с.
20. Дж.К. Бхузал (2007) [89]	$Q_T = 0,0009Q^{2,79}$ кг/с	Для р. Шамилия (Непал). Расход донных наносов составляет 15-20% от взвешенных. Q – в м ³ /с.
21. З.Д. Копалиани, М.М. Жук (2010) [41]	$Q_T = 0,0000002Q^3 - 0,0002Q^2 + 0,53Q - 39$ м ³ /сут (1966) $Q_T = 0,0003Q^2 + 0,22Q - 4$ м ³ /сут (1965) $Q_T = 0,00005Q^2 + 0,3Q + 36$ м ³ /сут (1956) $Q_T = 0,0002Q^2 + 0,33Q - 44$ м ³ /сут (1968) $Q_T = 0,0002Q^2 + 0,48Q - 47$ м ³ /сут (1966)	Для р. Кубани (Краснодар). Р. Кубань (х. Тиховской).

Автор	Формула	Примечания
	$Q_T = 0,0003Q^2 + 0,46Q - 104$ м ³ /сут (1956) $Q_T = 0,0008Q^2 + 0,04Q - 4$ м ³ /сут (1965) $Q_T = 0,0004Q^2 + 0,35Q - 52$ м ³ /сут (1968) $Q_T = 0,0004Q^2 + 0,41Q - 57$ м ³ /сут (1970) $Q_T = 0,0002Q^2 + 0,26Q - 9$ м ³ /сут (1966)	<p>Р. Кубань (Славянск-на-Кубани). Q_T – в рыхлом теле. Q – в м³/с.</p> <p>Расчеты произведены на основе гидрометрических измерения и эхолотирования дна.</p>
22. 3.3. Сирдари, А.А. Гхани, З.А. Хассан (2014) [133]	$Q_T = 0,168Q^{1,307}$ кг/с $Q_T = 0,2269Q + 0,131d_{50} + 0,0606\theta - 6,375QI - 0,2514$ кг/с $Q_T = 0,207Q + 0,429d_{50} + 0,242\theta - 25,696QI - 0,517$ кг/с Q – в м ³ /с, d_{50} – в мм.	<p>Формулы получены по полевым данным малых рек Малайзии (Курау, Ара, Луи, Семених: $q = 0,55 \dots 17,2$ м³/с, $V = 0,15 \dots 1,56$ м/с, $I = 0,0003 \dots 0,0312$, $H = 0,161 \dots 0,887$ м, $d_{50} = 0,50 \dots 2,29$ мм).</p>

Таблица А.6 – Формулы расхода донных наносов, использованные в главе 4 (формулы расположены в хронологическом порядке)

Автор	Формула	Примечания
ВНИИСТ [20]	$q_T = 16 \frac{V^5}{H} \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м}$	<p>V – скорость потока, м/с, H – глубина, м.</p> <p>Рекомендуется для мелких песчаных наносов с $d \leq 0,5$ мм, перемещающихся в форме гряд при средних скоростях потока $V \leq 1,5$ м/с.</p>
Р.А. Бэгнольда (1966) [20]	$q_T = \frac{\rho}{\rho_T - \rho} \frac{V^3}{C_d^2} \frac{e'}{\text{tg } \varphi} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$ $C_d = \sqrt{g} \left(5,66 \lg \frac{H}{\Delta} + 6 \right)$ $\Delta = 1,6d_{50}$ – для песка, $\Delta = 1,3d_{50}$ – для гравия, $\Delta = d_{50}$ – для крупного гравия. $\varphi = 24^\circ$.	<p>ρ_T – плотность наносов, кг/м³, ρ – плотность воды, кг/м³, V – скорость потока, м/с, C_d – коэффициент Шези по зернистой шероховатости, φ – угол внутреннего трения грунта ложа реки, e' – эмпирический параметр, зависящий от крупности частиц,</p>

Автор	Формула						Примечания
	d , мм	0,1	0,2	0,4	0,6	1,0	Δ – высота выступов шероховатости дна, м, d_{50} – медианный диаметр донных отложений, м.
	e'	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	
В.Н. Графа и Е.Р. Акароглу (1968) [20]	$q_T = 10,4 \frac{V_*^5}{\left(g\left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1\right)\right)^2} \text{ м}^3/\text{с}/\text{м}$						V_* – динамическая скорость, м/с, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения, ρ_T – плотность наносов, кг/м ³ , ρ – плотность воды, кг/м ³ , d_{50} – медианный диаметр донных отложений, м.

Приложение Б. Результаты сопоставлений формул расчета расхода донных наносов, выполненных предыдущими исследователями

Таблица Б.1 – Результаты сравнения методов расчета расхода донных наносов в исследованиях отечественных и зарубежных авторов (работы расположены в хронологическом порядке)

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
Г.И. Шамо́в (1952) [82]	6	Лабораторные данные опытов с однородным и смешанным составом песка $d = 0,3 \dots 10,0$ мм. Данные измерений на реках Волге и Самур $d = 0,48 \dots 13,0$ мм. Измерения на реках выполнялись батометром .	Шамо́в, Гвелесиани.	Сравнивались результаты расчетов по формулам Шамова, Лопатина, Шоклича, Гвелесиани, Гончарова, Егиазарова.
В.Ф. Талмаза (1963) [75]	16	Данные измерений на горных реках Средней Азии: Кара-Балты, Чон-Кызыл-Су; и Кавказа – Самур, а также в гидравлических лотках ($I = 0,0027 \dots 0,09$, $d_{50} = 3,3 \dots 43,0$ мм). Измерения на реках выполнялись батометром .	Талмаза (1962), Эйнштейн, Шамо́в (1952), Гончаров (1954), Шоклич.	Сравнивались формулы Дюбуа, Егиазарова, Орлова, Гостунского, Шоклича, Никитина, Рамазан, Гончарова (1938), Гончарова (1954), Гвелесиани, Леви, Шамова, Эйнштейна, Великанова, Доу-Го-Женя.
И.В. Егиазаров (1964) [22]	2	Данные измерений на реках Моне́й-Крик ($I = 0,0009$, $d = 1,9$ мм, $Q = 3,1 \dots 31,0$ м ³ /с) и Каран-	Егиазаров.	Сравнивались формулы Эйнштейна и Егиазарова.

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
		Куль ($I = 0,02 \dots 0,05$, $d = 2,0 \dots 100,0$ мм, $d_{max} = 13,0 \dots 63,0$ мм). Измерения выполнялись объемным методом .		
И.В. Боголюбова (1968) [6]	5	Измерения на р. Мзымте (Кавказ) ($I = 0,005 \dots 0,007$, $d_{50} = 22,0 \dots 117,0$ мм); р. Кара-Балты (Средняя Азия) ($I = 0,045$, $d_{50} = 22,0 \dots 49,0$ мм); р. Самур (Кавказ) ($I = 0,012$, $d_{50} = 13,0 \dots 63,0$ мм). Измерения на р. Мзымте выполнялись объемным методом в водохранилище Краснополянской ГЭС, а на реках Кара-Балты и Самур выполнялись батометром .	Шамов. Относительная ошибка вычисленных величин $\Delta = \left[\frac{q_{T_{рассч}} - q_{T_{изм}}}{q_{T_{изм}}} \right] = 0,20 \dots 2,20$.	Сравнивались формулы Шамова, Гончарова, Леви, Россинского, Егиазарова.
А.Ю. Умаров (1968) [78]	8	Данные измерений объемным методом на горной реке Каран-Куль ($I = 0,02 \dots 0,05$, $d = 2,0 \dots 100$ мм, $d_{max} = 10,0 \dots 500$ мм). Измерения выполнялись объемным методом .	Умаров (1968), Егиазаров (1964), Эйнштейн (1950).	Сравнивались формулы Леви, Егиазарова, Шамова, Гончарова, Мейер-Петера, Эйнштейна, Гвелесиани, Умарова.
И.Ф. Карасев (1975) [29]	4	Данные измерений на горных реках Средней Азии: Кара-Балты	Гончаров (для Кара-Балты),	Для сравнения использовались формулы Гончарова, Умарова,

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
		и Каран-Куль.	Карасев	Россинского, Карасева.
Дж.С. Батхурст, В.Х. Граф, Х.Х Као (1987) [88]	6	Измерения в гидравлических лотках ($I = 0,0027 \dots 0,09$, $d_{50} = 3,3 \dots 43,0$ мм) и на горных реках ($I = 0,0002 \dots 0,04$, $d_{50} = 12,0 \dots 260,0$ мм).	Шоклич (1962).	Сравнивались формулы Аккерса и Уайта, Мейер-Петера и Мюллера, Смарта, Бегнольда, Шоклича, Мицуяма.
Л. Ван Рейн (1989) [140]	3	500 измерений в лотках и в полевых условиях: $d = 0,01 \dots 1,5$ мм.	Ван Рейн 63% расчетов в пределах $0,5 \leq \frac{q_{T\text{расч}}}{q_{T\text{изм}}} \leq 2$.	Сравнивались формулы Ван Рейна, Мейер-Петера, Мюллера, Фриджилинка.
Х. С. Лоу (1989) [119]	8	Измерения в гидравлическом лотке заменителей наносов ($1 < \frac{\rho_T}{\rho} < 2,5$, $d = 3,5$ мм).	Эйнштейн, Смарт (модификация Х.С. Лоу).	Сравнивались формулы Шильдса, Мейер-Петера и Мюллера, Бегнольда, Ялина, Смарта, Эйнштейна, Х.С. Лоу, Эйнштейна и Брауна.
Н.С. Знаменская (1992) [24]	22	Данные измерений на реках: Дон, Полометь, Мзымта, Волга, Самур, Терек, Дунай и др. Данные по каналам Средней Азии. Данные по селю на Алма-Атинке, измерения расхода донных наносов на р. Элегис. Данные экспериментов по склоновой эрозии, лотковые эксперименты, гидравлические модели.	Для лабораторных данных: Леви, Знаменской-Клейн, Ратнера, Кондепа, Гарде, Вафина; для данных по рекам: Маддока, Дебольского, Леви; для данных по каналам: Маддока и Знаменской; для данных по горным рекам: Кондепа-Гарде,	Сравнивались формулы Леви, Маддока, Знаменской, Ратнер, Ингелунда-Хансена, Вафина, Кондепа-Гарде, Мейер-Петера, Гончарова, Лопатина, Мейер-Петера и Шильдса, Карасева, Дебольского-Железнякова, Егиазарова. Шамова, Гришанина, Сато-Киккава, Чернышова, Талмазы, Мурамото, Дебольского, Гарде.

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
			Гончарова.	
Г.М. Хаберсак, Дж.Б. Ларонн (2002) [109]	13	Измерения на р. Драу в Австрии: $I = 0,0002$, d_{50} поверхностного слоя 65 мм, d_{50} подповерхностного слоя 28 мм, $Q = 64 \dots 380 \text{ м}^3/\text{с}$. Измерения выполнялись батометром Хелли-Смита .	Формула Цанке: 75% в пределах $0,5 \leq \frac{q_{\text{трассч}}}{q_{\text{тр.изм}}} \leq 2$; формулы Эйнштейна, Мейер-Петера и Шоклича (1943): $66,7\%$ расчетов в этом же интервале. Установлено, что формула Цанке (1990), а также Паркера после их модификации хорошо описывают расход донных наносов при их неполной подвижности.	Сравнивались формулы Цанке, Эйнштейна, Мейер-Петера, Шоклича (1943), Шоклича (1934), Эйнштейна, Бегнольда, Эйнштейна (пофракционно), Ялина, Мейер-Петера и Мюллера, Паркера, Аккерса и Уайта, Уайта и Дея.
Дж.Дж. Барри, Дж.М. Баффингтон, Дж.Г. Кинг (2004) [87]	9	Данные измерений на 24 горных потоках Айдахо (США): $I = 0,002 \dots 0,05$, для поверхностного слоя отложений $d_{50} = 38,0 \dots 204,0$ мм, для подповерхностного слоя $d_{50} = 14,0 \dots 44,0$ мм, среднегодовалый максимальный расход воды $2,2-731,0 \text{ м}^3/\text{с}$.	Барри, Баффингтон и Кинг, Аккерс и Уайт.	Сравнивались расчеты по формулам Мейер-Петера и Мюллера (2 формулы), Аккерса и Уайта, Бегнольда (2 формулы), Паркера и др. (3 формулы), а также Барри, Баффингтона и Кинга.

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
		Измерения выполнялись батометром Хелли-Смита.		
З.Д. Копалиани, А.А. Костюченко (2004) [42]	Около 200 формул	Измерения в гидравлических лотках, на размываемых моделях, в каналах, на горных и равнинных реках (при грядовой и бесструктурной формах транспорта донных наносов).	Формула ГГИ для грядового движения наносов, Шамова при их безгрядовом движении; Абальянца для земляных каналов, Ромашина для горных рек черноморского побережья Кавказа, Тимаровой и Классен для горных рек Средней Азии	Сравнение формул выполнялось дифференцированно для измерений в лотках ($d = 0,1 \dots 0,29$ мм; $Fr = 0,24 \dots 3,5$); на размываемых гидравлических моделях ($d = 0,22 \dots 3,25$ мм; $Fr = 0,16 \dots 1,17$); в каналах ($d = 0,1 \dots 1,46$ мм; $Fr = 0,08 \dots 0,53$); на горных ($d = 1,09 \dots 116$ мм; $Fr = 0,25 \dots 1,18$); и равнинных ($d = 0,06 \dots 9,7$ мм; $Fr = 0,05 \dots 0,50$) реках.
Б. Каменен и М. Ларсон (2007) [96]	4	Данные измерений на р. Рио Кордон в Итальянских Альпах ($I = 0,013$, $d = 130$ мм, $d_{90} = 330$ мм). Измерения лабораторные (в основном) и полевые.	Мейер-Петер и Мюллер (1948): $0,92 \leq \frac{q_{\text{трассч}}}{q_{\text{тизм}}} \leq 1,1$, Смарт и Ягги (1933) $1,3 \leq \frac{q_{\text{трассч}}}{q_{\text{тизм}}} \leq 1,4$.	Сравнивались формулы Мейер-Петера и Мюллера (1948), Шоклича, Смарта и Ягги (2 модификации), Пика, Бэгнольда, Рикенманна.
Ч.Ч. Киат, А.А. Гхани и Л.Х. Вен (2007) [114]	5	Данные 342 измерений в 14 измерительных створах рек Малайзии ($Q = 0,73 \dots 87,8$ м ³ /с, $I = 0,0003 \dots 0,0167$, $d = 0,37 \dots 3,10$ мм). Измерения выполнялись	65% вычислений в пределах $0,5 \leq \frac{q_{\text{трассч}}}{q_{\text{тизм}}} \leq 2$ дала формула Эйнштейна в модификации авторов.	Сравнивались формулы Эйнштейна (1942, 1950), Эйнштейна-Брауна (1950), Мейер-Петера и Мюллера (1948), Шильдса (1936) и формула авторов.

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
		батометром Хелли-Смита.		
Г. Бомбар, М.С. Гуней (2010) [91]	14	Лабораторные данные опытов в гидравлическом лотке с однородным песком $d_{50} = 4,8$ мм, при гидравлических условиях: $H = 4,0 \dots 10,2$ см; $V = 37,5 \dots 83,3$ см/с; $Fr = 0,60 \dots 0,83$.	Мейер-Петер и Мюллер (1948), Роттнер (1959).	Сравнивались расчеты по формулам Дю Буа (1879), Шоклича (1934 и 1943), Шильдса (1936), Мейер-Петера (1948), Мейер-Петера и Мюллера (1948) (3 модификации), Роттнера (1959), Ашиды и Мицуэ (1972), Ингелунда и Фредзо (1976), Фернандеза Лика и Ван Бика (1976) – (2 модификации), Паркера (1979).
С. Талукдар, Б. Кумар, С. Дутта (2012) [138]	32	Данные измерений расхода донных наносов в гидравлических лотках (1282 значения) в диапазоне уклонов дна $I > 0,001$; крупности частиц $0,13 \leq d \leq 44,3$ мм; глубины потока $0,07 \leq H \leq 1,09$ м; скорости течений $0,81 \leq V \leq 2,88$ м/с.	Эшмор (1988), Вонг и Паркер (2006) для «умеренного» расхода наносов и Граф и Сушка (1987); Жюльен (2002) для «интенсивного» расхода наносов. Границей между «интенсивным» и «умеренным» расходом наносов принято значение параметра интенсивности транспорта наносов Эйнштейна	Сравнивались формулы Шильдса (1936), Уилсона (1966), Фернандеза Лика и Ван Бика (1976), Графа и Сушки (1987), Эшмора (1988), Лоу (1989), Уайберга и Смита (1989), Солсби (1997), Графа (1998), Рибберинка (1998), Вонга и Паркера (2006), Мейер-Петера (1934), Мейер-Петера и Мюллера (1948), Шоклича (1934), Эйнштейна (1950), Паркера (1979), Ялина (1963), Ингелунда и Хансена (1967), Ашиды и Мицуэ (1972), Ингелунда и Фредзо (1976), Нельсона (1988), Мадсена (1991), Фредзо и Дейгаарда (1992), Ван Рейна (1993),

Автор работы, в которой выполнено взаимосравнение	Количество сравниваемых формул	Данные измерений, использованных для взаимосравнения формул	Авторы формул показавших наилучшие результаты	Какие формулы сравнивались
1	2	3	4	5
			$\Phi = \frac{q_T}{\gamma_T} \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_T - \rho}\right) \frac{1}{gd^3}} =$ 0,4.	Ниньо и Гарсиа (1994), Жюльена (1995, 2002), Абрахамса и Гао (2006), Каменена и др. (2006), Уилкока (2001), Уилкока и Кроу (2003).
3.3. Сирдари, А.А. Гхани, З.А. Хассан (2014) [133]	6	Полевые данные по малым рекам Малайзии (Курау, Ара, Луи, Семених: $q = 0,55 \dots 17,2$ м ³ /с, $V = 0,15 \dots 1,56$ м/с, $I = 0,0003 \dots 0,0312$, $H = 0,161 \dots 0,887$ м, $d_{50} = 0,50 \dots 2,29$ мм). Измерения выполнялись батометром Хелли-Смита.	По среднее значению оценки $0,5 \leq \frac{q_{T\text{рассч}}}{q_{T\text{изм}}} \leq 2$ лучшие результаты показали формулы Ван Рейна (0,49), Мейер-Петера и Мюллера (0,54) и Чанга (2,54). По числу попаданий в интервал $0,5 \leq \frac{q_{T\text{рассч}}}{q_{T\text{изм}}} \leq 2$ лидируют формулы Мейер-Петера и Мюллера (37%), Вонга и Пракера (37%) и Роттнера (31%).	Сравнивались формулы Мейер-Петера и Мюллера (1948), Роттнера, Чанга, Жюльена (2002), Вонга и Паркера (2006), Ван Рейна (1993).

Приложение В. Данные измерений характеристик транспорта донных наносов в природных и лабораторных условиях

Таблица В.1 – Равнинные реки первой категории (грядовое движение донных наносов)

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
р. Вычегда (1965-1966) (измерения ГГИ и Ленгипроречтранс в 38-40 км выше устья) [1]										
7,25	0,3	0,86	0,03	–	0,10	32,0	0,52	0,000041	4,41	0,07
6,60	0,3	0,86	0,03	–	0,11	15,0	0,80	0,000032	2,27	0,12
6,60	0,3	0,86	0,03	–	0,11	15,0	0,80	0,000035	2,27	0,12
6,70	0,3	1,00	0,03	–	0,12	40,0	0,80	0,000023	5,97	0,12
6,70	0,3	1,00	0,03	–	0,12	40,0	0,85	0,000023	5,97	0,13
6,30	0,3	1,00	0,03	–	0,13	35,0	0,45	0,000035	5,56	0,07
6,30	0,3	1,00	0,03	–	0,13	35,0	0,75	0,000035	5,56	0,12
7,00	0,3	1,00	0,03	–	0,12	40,0	0,75	0,000046	5,71	0,11
7,00	0,3	1,00	0,03	–	0,12	40,0	0,50	0,000046	5,71	0,07
6,45	0,3	1,20	0,03	–	0,15	35,0	0,60	0,000058	5,43	0,09
6,45	0,3	1,20	0,03	–	0,15	35,0	0,60	0,000058	5,43	0,09
5,50	0,3	1,20	0,03	–	0,16	18,0	0,40	0,000093	3,27	0,07
6,90	0,3	1,20	0,03	–	0,15	37,0	0,50	0,000046	5,36	0,07
6,90	0,3	1,20	0,03	–	0,15	37,0	1,00	0,000046	5,36	0,14
5,25	0,3	1,20	0,03	–	0,17	40,0	0,50	0,000046	7,62	0,10
5,25	0,3	1,20	0,03	–	0,17	40,0	0,60	0,000046	7,62	0,11
5,90	0,3	1,20	0,03	–	0,16	30,0	0,70	0,000046	5,08	0,12
5,90	0,3	1,20	0,03	–	0,16	30,0	0,50	0,000046	5,08	0,08
6,00	0,3	1,20	0,03	–	0,16	35,0	0,60	0,000049	5,83	0,10
6,10	0,3	1,20	0,03	–	0,16	35,0	0,65	0,000046	5,74	0,11
6,10	0,3	1,20	0,03	–	0,16	35,0	0,70	0,000046	5,74	0,11
3,00	0,3	0,85	0,03	–	0,16	25,0	0,50	0,000058	8,33	0,17
р. Волга (1966) [71]										
5,40	0,22	0,88	0,02	0,000150	0,12	–	0,60	0,000022	–	0,11

$H, \text{ M}$	$d, \text{ MM}$	$V, \text{ M/c}$	$w, \text{ M/c}$	I	Fr	$l_r, \text{ M}$	$h_r, \text{ M}$	$C_r, \text{ M/c}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
5,05	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,13	–	0,75	0,000025	–	0,15
4,85	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,13	–	0,45	0,000017	–	0,09
5,15	0,22	0,97	0,02	0,000150	0,14	–	0,70	0,000069	–	0,14
5,45	0,22	0,90	0,02	0,000150	0,12	–	0,80	0,000069	–	0,15
5,75	0,22	0,88	0,02	0,000150	0,12	–	0,65	0,000092	–	0,11
5,35	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,12	–	0,80	0,000022	–	0,15
5,25	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,12	–	0,50	0,000028	–	0,10
5,75	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,12	–	0,60	0,000053	–	0,10
5,70	0,22	0,93	0,02	0,000150	0,12	–	0,80	0,000022	–	0,14
5,75	0,22	0,92	0,02	0,000150	0,12	–	0,75	0,000061	–	0,13
5,35	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,12	–	0,50	0,000031	–	0,09
5,60	0,22	0,89	0,02	0,000150	0,12	–	0,60	0,000022	–	0,11
5,40	0,27	0,89	0,03	0,000130	0,12	–	0,52	0,000017	–	0,10
4,70	0,27	0,89	0,03	0,000130	0,13	–	0,45	0,000022	–	0,10
4,90	0,27	0,89	0,03	0,000130	0,13	–	0,40	0,000022	–	0,08
4,80	0,27	0,90	0,03	0,000130	0,13	–	0,40	0,000039	–	0,08
5,50	0,27	0,90	0,03	0,000150	0,12	–	0,70	0,000022	–	0,13
5,50	0,27	0,90	0,03	0,000150	0,12	–	0,50	0,000019	–	0,09
5,20	0,27	0,94	0,03	0,000150	0,13	–	0,47	0,000022	–	0,09
4,90	0,27	0,94	0,03	0,000150	0,14	–	0,70	0,000031	–	0,14
4,80	0,27	0,88	0,03	0,000150	0,13	–	0,65	0,000036	–	0,14
4,30	0,27	0,86	0,03	0,000150	0,13	–	0,45	0,000058	–	0,10
6,10	0,27	0,95	0,03	0,000150	0,12	–	0,82	0,000036	–	0,13
5,10	0,27	0,88	0,03	0,000195	0,12	–	0,60	0,000036	–	0,12
5,30	0,25	0,88	0,03	0,000195	0,12	–	0,60	0,000011	–	0,11
5,30	0,25	0,88	0,03	0,000195	0,12	–	0,50	0,000011	–	0,09
5,00	0,25	0,92	0,03	0,000195	0,13	–	0,65	0,000022	–	0,13
5,20	0,3	0,92	0,03	0,000195	0,13	–	0,40	0,000039	–	0,08
4,80	0,3	0,92	0,03	0,000195	0,13	–	0,90	0,000028	–	0,19

$H, \text{ м}$	$d, \text{ мм}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
5,00	0,3	0,89	0,03	0,000195	0,13	–	0,90	0,000025	–	0,18
5,10	0,3	0,89	0,03	0,000195	0,13	–	0,75	0,000033	–	0,15
5,20	0,35	0,89	0,04	0,000195	0,12	–	0,80	0,000039	–	0,15
р. Днепр (1968) [1]										
9,00	0,5	1,05	0,06	0,000069	0,11	–	1,20	0,000035	–	0,13
8,50	0,5	1,07	0,06	0,000069	0,12	–	1,10	0,000046	–	0,13
9,50	0,5	0,90	0,06	0,000069	0,09	–	1,00	0,000046	–	0,11
6,50	0,5	1,15	0,06	0,000069	0,14	–	1,00	0,000078	–	0,15
7,00	0,5	1,00	0,06	0,000069	0,12	–	1,00	0,000078	–	0,14
5,00	0,4	0,80	0,04	0,000069	0,11	–	0,70	0,000058	–	0,14
6,00	0,4	0,90	0,04	0,000069	0,12	–	0,90	0,000058	–	0,15
7,50	0,4	0,90	0,04	0,000069	0,10	–	1,00	0,000046	–	0,13
6,50	0,5	1,00	0,06	0,000069	0,13	–	1,00	0,000058	–	0,15
7,00	0,4	0,95	0,04	0,000069	0,11	–	1,00	0,000041	–	0,14
6,50	0,5	1,05	0,06	0,000069	0,13	–	1,00	0,000075	–	0,15
р. Волга (1974) (измерения ГГИ и Гидропроекта в Нижнем бьефе Куйбышевской ГЭС) [1]										
12,90	0,35	1,05	0,04	–	0,09	–	1,40	0,000029	–	0,11
13,50	0,35	1,00	0,04	–	0,09	–	1,30	0,000021	–	0,10
8,50	0,35	0,98	0,04	–	0,11	–	0,70	0,000075	–	0,08
8,50	0,35	0,98	0,04	–	0,11	–	0,90	0,000058	–	0,11
7,70	0,35	0,98	0,04	–	0,11	–	0,50	0,000092	–	0,06
11,00	0,35	1,10	0,04	–	0,11	–	0,90	0,000033	–	0,08
11,00	0,35	1,10	0,04	–	0,11	–	0,85	0,000032	–	0,08
8,90	0,35	1,15	0,04	–	0,12	–	1,00	0,000035	–	0,11
10,00	0,35	1,15	0,04	–	0,12	–	1,00	0,000035	–	0,10
9,60	0,35	0,95	0,04	–	0,10	–	1,00	0,000046	–	0,10
13,00	0,35	1,20	0,04	–	0,11	–	1,00	0,000069	–	0,08
7,00	0,35	0,90	0,04	–	0,11	–	1,40	0,000052	–	0,20
7,00	0,35	0,90	0,04	–	0,11	–	1,25	0,000035	–	0,18

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
р. Дон (1974) [28]										
5,15	0,45	1,00	0,05	–	0,14	–	0,46	0,000046	–	0,09
3,80	0,38	0,90	0,04	–	0,15	–	0,31	0,000081	–	0,08
3,80	0,3	0,80	0,03	–	0,13	–	0,37	0,000053	–	0,10
4,20	0,38	0,85	0,04	–	0,13	–	0,52	0,000100	–	0,12
4,90	0,45	0,80	0,05	–	0,12	–	0,66	0,000069	–	0,13
3,10	0,35	0,75	0,04	–	0,14	–	0,42	0,000066	–	0,14
2,90	0,32	0,72	0,03	–	0,13	–	0,32	0,000067	–	0,11
2,91	0,35	0,80	0,04	–	0,15	–	0,35	0,000053	–	0,12
р. Иртыш (1976) (измерения ГГИ у д. Медведчиково) [1]										
11,00	0,36	1,12	0,04	–	0,11	26,5	1,35	0,000058	2,41	0,12
11,60	0,36	1,12	0,04	–	0,10	29,0	1,20	0,000061	2,50	0,10
11,70	0,36	1,12	0,04	–	0,10	27,0	1,30	0,000054	2,31	0,11
12,20	0,36	1,12	0,04	–	0,10	25,0	1,30	0,000058	2,05	0,11
13,50	0,36	0,99	0,04	–	0,09	32,0	1,10	0,000076	2,37	0,08
13,00	0,36	0,99	0,04	–	0,09	34,0	1,75	0,000088	2,62	0,13
р. Белая (1978) (измерения ГГИ в г. Уфа) [1]										
12,70	0,6	1,67	0,07	–	0,15	35,0	1,75	0,000127	2,76	0,14
12,90	0,6	1,67	0,07	–	0,15	24,0	1,35	0,000208	1,86	0,10
12,70	0,6	1,41	0,07	–	0,13	22,0	1,05	0,000243	1,73	0,08
12,80	0,6	1,41	0,07	–	0,13	22,0	1,10	0,000231	1,72	0,09
11,30	2,9	1,83	0,26	–	0,17	27,0	1,10	0,000602	2,39	0,10
11,30	2,9	1,83	0,26	–	0,17	38,0	1,30	0,000637	3,36	0,12
11,80	2,9	1,81	0,26	–	0,17	27,0	0,95	0,000579	2,29	0,08
р. Кама (1979) (измерения ГГИ и Гипроречтранс в 8 км ниже Нижнекамской ГЭС) [1]										
12,40	0,73	1,80	0,09	–	0,16	120,0	2,00	0,000093	9,68	0,16
12,60	0,46	2,10	0,05	–	0,19	18,0	1,50	0,000278	1,43	0,12
13,70	0,46	1,90	0,05	–	0,16	20,0	1,40	0,000255	1,46	0,10
13,10	0,41	1,80	0,05	–	0,16	21,0	1,30	0,000153	1,60	0,10

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
12,20	0,43	1,60	0,05	–	0,15	28,0	1,10	0,000065	2,30	0,09
р. Парана (1983) [84]										
22,13	0,405	1,38	0,045	–	0,09	498,00	3,77	–	–	0,17
22,53	0,405	1,43	0,045	–	0,10	488,33	3,7	–	–	0,16
23,17	0,405	1,48	0,045	–	0,10	360,50	4,1	–	–	0,18
23,8	0,405	1,53	0,045	–	0,10	314,88	4,56	–	–	0,19
23,37	0,405	1,64	0,045	–	0,11	325,41	4,71	–	–	0,20
23,47	0,405	1,69	0,045	–	0,11	295,60	4,64	–	–	0,20
24,64	0,405	1,66	0,045	–	0,11	346,40	5,52	–	–	0,22
р. Парана (1992) [84]										
21,16	0,405	1,19	0,045	–	0,08	88,40	1,76	–	–	0,08
20,89	0,405	1,26	0,045	–	0,09	168,67	2,46	–	–	0,12
21,17	0,405	1,33	0,045	–	0,09	158,30	2,43	–	–	0,11
22,18	0,405	1,37	0,045	–	0,09	218,13	3,09	–	–	0,14
22,72	0,405	1,41	0,045	–	0,09	232,65	3,39	–	–	0,15
22,86	0,405	1,45	0,045	–	0,10	269,80	4,48	–	–	0,20
23,34	0,405	1,56	0,045	–	0,10	246,80	4,57	–	–	0,20
23,52	0,405	1,66	0,045	–	0,11	244,29	4,62	–	–	0,20
24,45	0,405	1,63	0,045	–	0,11	226,81	4,23	–	–	0,17

Таблица В.2 – Равнинные реки второй категории (грядовое движение донных наносов)

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
р. Хи́и (Игайя) (1959) [131]										
0,208	1,44	0,580	0,18	0,001150	0,41	0,80	0,01	0,001690	3,82	0,07
0,307	1,44	0,725	0,18	0,000840	0,42	1,12	0,03	0,000980	3,65	0,10
0,324	1,44	0,592	0,18	0,001060	0,33	0,96	0,03	0,000870	2,96	0,10
0,397	1,44	0,742	0,18	0,001060	0,38	1,24	0,03	0,001090	3,12	0,08
0,425	1,44	0,713	0,18	0,000850	0,35	1,38	0,05	0,000920	3,25	0,12
0,493	1,44	0,701	0,18	0,000860	0,32	1,39	0,07	0,000730	2,82	0,14

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,590	1,44	0,741	0,18	0,000880	0,31	1,79	0,09	0,001040	3,03	0,14
0,652	1,44	0,930	0,18	0,001480	0,37	2,34	0,09	0,001010	3,59	0,14
0,699	1,44	0,801	0,18	0,001010	0,31	1,34	0,08	0,001050	1,92	0,12
0,732	1,44	0,807	0,18	0,001530	0,30	2,84	0,14	0,000700	3,88	0,19
р. Хии (Курихара) (1959) [131]										
0,202	1,33	0,700	0,16	0,001660	0,50	1,20	0,04	0,001510	5,94	0,21
0,372	1,33	0,752	0,16	0,001380	0,39	1,59	0,08	0,001000	4,27	0,20
0,387	1,33	0,630	0,16	0,000890	0,32	1,12	0,06	0,000850	2,89	0,16
0,454	1,33	0,803	0,16	0,001420	0,38	1,19	0,06	0,001520	2,62	0,14
р. Хии (Надабун) (1959) [131]										
0,705	1,10	0,788	0,13	0,001530	0,30	2,13	0,25	0,000500	3,02	0,35
0,848	1,10	0,885	0,13	0,001530	0,31	2,76	0,22	0,000930	3,25	0,26
0,877	1,10	0,892	0,13	0,001420	0,30	2,26	0,17	0,000940	2,58	0,20
1,033	1,10	0,896	0,13	0,001530	0,28	2,87	0,25	0,001090	2,78	0,24
р. Полометь (1968) [46]										
1,40	1,50	1,40	0,18	–	0,38	–	0,35	0,001000	–	0,25
0,80	1,20	0,86	0,15	–	0,31	–	0,20	0,000400	–	0,25
1,00	1,60	1,30	0,20	0,000650	0,42	–	0,35	0,000800	–	0,35
1,40	1,60	1,25	0,20	–	0,34	–	0,42	0,000717	–	0,30
1,30	1,50	1,15	0,18	–	0,32	–	0,55	0,000650	–	0,42
1,10	1,20	0,95	0,15	0,000660	0,29	–	0,45	0,000517	–	0,41
0,90	1,20	0,92	0,15	0,000750	0,31	–	0,30	0,000500	–	0,33
0,70	1,20	0,88	0,15	0,000420	0,34	–	0,30	0,000417	–	0,43
0,60	1,10	0,75	0,13	–	0,31	–	0,20	0,000300	–	0,33
0,80	1,10	0,78	0,13	–	0,28	–	0,22	0,000350	–	0,28
0,90	1,10	0,91	0,13	–	0,31	–	0,30	0,000517	–	0,33
1,10	1,10	0,98	0,13	0,000360	0,30	–	0,40	0,000633	–	0,36
0,49	0,80	0,68	0,09	–	0,31	–	0,17	0,000417	–	0,35
0,57	0,90	0,80	0,11	–	0,34	–	0,23	0,000650	–	0,40

$H, \text{ м}$	$d, \text{ мм}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,87	0,80	1,01	0,09	–	0,35	–	0,41	0,000333	–	0,47
1,20	1,40	1,06	0,17	–	0,31	–	0,33	0,000667	–	0,28
1,40	1,50	1,15	0,18	0,000720	0,31	–	0,45	0,000633	–	0,32
1,60	1,90	1,23	0,21	–	0,31	–	0,39	0,000667	–	0,24
1,50	1,90	1,47	0,21	0,000800	0,38	–	0,50	0,000767	–	0,33
1,75	2,00	1,50	0,22	0,000860	0,36	–	0,60	0,000900	–	0,34
2,10	2,00	1,61	0,22	–	0,35	–	0,75	0,000833	–	0,36
2,00	2,00	1,47	0,22	0,000860	0,33	–	0,70	0,001000	–	0,35
2,00	2,80	1,44	0,26	–	0,33	–	0,50	0,001000	–	0,25
1,60	1,80	1,31	0,21	–	0,33	–	0,45	0,000883	–	0,28
1,20	1,30	1,04	0,16	0,000480	0,30	–	0,38	0,000667	–	0,32
1,25	1,40	1,04	0,17	–	0,30	–	0,35	0,000600	–	0,28
1,35	1,50	0,93	0,18	–	0,26	–	0,30	0,000433	–	0,22
1,35	1,30	0,90	0,16	0,000400	0,25	–	0,35	0,000400	–	0,26
0,90	1,00	0,81	0,12	–	0,27	–	0,30	0,000450	–	0,33
0,90	1,10	0,81	0,13	–	0,27	–	0,30	0,000350	–	0,33
0,55	0,90	0,60	0,11	0,000320	0,26	–	0,15	0,000300	–	0,27
0,85	0,60	0,90	0,07	–	0,31	–	0,35	0,000500	–	0,41
1,00	0,80	1,12	0,09	–	0,36	–	0,50	0,000383	–	0,50
1,20	1,90	1,13	0,21	–	0,33	–	0,30	0,000667	–	0,25
1,72	1,30	1,28	0,16	–	0,31	–	0,68	0,000500	–	0,40
1,55	1,90	1,37	0,21	–	0,35	–	0,50	0,000767	–	0,32
1,40	1,50	1,24	0,18	–	0,33	–	0,40	0,000583	–	0,29
1,65	2,70	1,10	0,26	0,000480	0,27	–	0,30	0,000833	–	0,18
1,65	2,00	1,30	0,22	–	0,32	–	0,45	0,000600	–	0,27
2,40	4,00	1,70	0,31	0,001120	0,35	–	0,50	0,001483	–	0,21
1,90	3,50	1,42	0,29	–	0,33	–	0,40	0,001283	–	0,21
1,60	2,20	1,12	0,23	0,000750	0,28	–	0,25	0,000933	–	0,16
1,50	1,50	1,21	0,18	–	0,32	–	0,40	0,000533	–	0,27

H , м	d , мм	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
1,00	0,90	0,91	0,11	–	0,29	–	0,40	0,000350	–	0,40
0,82	0,80	0,69	0,09	–	0,24	–	0,28	0,000333	–	0,34
р. Ануй (1991) [5]										
2,10	4,90	1,30	0,34	–	0,29	–	0,50	0,000639	–	0,24
2,20	4,50	1,30	0,33	–	0,28	–	0,40	0,000556	–	0,18
2,00	0,64	1,30	0,07	–	0,29	–	0,60	0,000556	–	0,30
1,80	1,30	1,40	0,16	–	0,33	–	0,50	0,000500	–	0,28
1,90	1,40	1,40	0,17	–	0,32	–	0,40	0,000417	–	0,21
р. Лосиха (1991) [5]										
1,45	0,26	0,95	0,03	0,000270	0,25	11,00	0,48	0,000556	7,59	0,33
2,15	0,26	1,06	0,03	0,000270	0,23	13,00	0,70	0,000231	6,05	0,33
2,05	0,30	1,20	0,03	0,000270	0,27	15,00	0,50	0,000389	7,32	0,24
2,15	0,26	0,61	0,03	0,000270	0,13	17,50	0,85	0,000339	8,14	0,40
2,00	0,26	0,81	0,03	0,000270	0,18	18,50	0,90	0,000308	9,25	0,45
2,00	0,30	1,62	0,03	0,000270	0,37	19,20	0,80	0,000308	9,60	0,40
2,30	0,28	1,37	0,03	0,000270	0,29	14,20	0,60	0,000383	6,17	0,26
1,90	0,28	1,33	0,03	0,000270	0,31	21,00	0,95	0,000444	11,05	0,50
2,10	0,31	1,20	0,03	0,000270	0,26	14,50	0,60	0,000206	6,90	0,29
1,90	0,27	1,05	0,03	0,000270	0,24	14,50	0,62	0,000472	7,63	0,33
1,85	0,27	1,00	0,03	0,000270	0,23	18,70	1,00	0,000333	10,11	0,54
р. Тогул (1991) [5]										
5,40	1,00	1,58	0,12	–	0,22	5,00	0,50	0,000278	0,93	0,09
5,00	1,00	1,76	0,12	–	0,25	8,50	0,50	0,000347	1,70	0,10
4,60	1,00	1,76	0,12	–	0,26	5,00	0,50	0,000347	1,09	0,11
4,50	1,00	1,76	0,12	–	0,26	5,00	0,50	0,000347	1,11	0,11
4,50	1,00	1,76	0,12	–	0,26	4,00	0,50	0,000311	0,89	0,11
3,40	1,00	1,20	0,12	–	0,21	8,20	0,40	0,000378	2,41	0,12
3,30	1,00	1,20	0,12	–	0,21	8,20	0,50	0,000378	2,48	0,15
3,40	1,00	1,20	0,12	–	0,21	6,00	0,50	0,000414	1,76	0,15

$H, \text{ м}$	$d, \text{ мм}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
3,40	1,00	1,20	0,12	–	0,21	5,20	0,30	0,000414	1,53	0,09
3,60	1,40	1,20	0,17	–	0,20	9,50	0,50	0,000139	2,64	0,14
3,60	1,40	1,20	0,17	–	0,20	8,00	0,50	0,000222	2,22	0,14

Таблица В.3 – Гидравлические модели горно-предгорных рек и лотковые эксперименты (грядовое движение донных наносов)

H , м	d , м	d_{50} , м	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
8-метровый лоток (2011) [33]											
0,049	0,0011	–	0,59	0,13	0,0041	0,85	0,314	0,006	0,00520	6,41	0,12
0,050	0,0011	–	0,62	0,13	0,0039	0,89	0,180	0,007	0,00650	3,60	0,14
0,079	0,0011	–	0,71	0,13	0,0031	0,81	0,490	0,010	0,00440	6,20	0,13
0,097	0,0011	–	0,65	0,13	0,0027	0,66	0,520	0,010	0,00260	5,36	0,10
0,096	0,0011	–	0,73	0,13	0,0028	0,75	0,480	0,013	0,00420	5,00	0,14
0,145	0,0011	–	0,67	0,13	0,0035	0,56	0,560	0,016	0,00200	3,86	0,11
0,097	0,0015	–	0,69	0,17	0,0045	0,71	0,550	0,014	0,00330	5,67	0,14
0,140	0,0015	–	0,68	0,17	0,0043	0,58	0,480	0,017	0,00260	3,43	0,12
0,113	0,0015	–	0,92	0,17	0,0057	0,87	0,330	0,024	0,00870	2,92	0,21
0,144	0,0015	–	0,72	0,17	0,0034	0,61	0,420	0,014	0,00480	2,92	0,10
0,140	0,0015	–	0,74	0,17	0,0046	0,63	0,590	0,018	0,00360	4,21	0,13
0,133	0,0015	–	0,78	0,17	0,0057	0,68	0,570	0,020	0,00490	4,29	0,15
0,052	0,0011	–	0,56	0,13	0,0042	0,78	0,300	0,006	0,00640	5,77	0,12
0,051	0,0011	–	0,57	0,13	0,0047	0,81	0,320	0,007	0,00990	6,27	0,14
0,052	0,0011	–	0,56	0,13	0,0048	0,78	0,400	0,007	0,00720	7,69	0,13
0,103	0,0011	–	0,69	0,13	0,0055	0,68	0,630	0,018	0,00350	6,12	0,17

H , м	d , м	d_{50} , м	V , м/с	w , м/с	I	Fr	l_r , м	h_r , м	C_r , м/с	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,100	0,0011	–	0,77	0,13	0,0043	0,78	0,560	0,017	0,00480	5,60	0,17
30-метровый лоток (1972) [36]											
0,150	0,0065	0,0045	1,07	0,40	0,0070	0,88	0,799	0,030	0,01100	5,33	0,20
0,230	0,0065	0,0045	1,14	0,40	0,0070	0,76	1,000	0,050	0,00800	4,35	0,22
0,200	0,0065	0,0045	1,28	0,40	0,0070	0,91	0,800	0,045	0,01170	4,00	0,23
0,195	0,0065	0,0045	1,45	0,40	0,0100	1,05	0,900	0,042	0,03070	4,62	0,22
0,210	0,0065	0,0045	1,43	0,40	0,0050	1,00	0,900	0,040	0,02350	4,29	0,19
0,130	0,0065	0,0045	1,15	0,40	0,0050	1,02	0,600	0,015	0,01930	4,62	0,12
0,165	0,0065	0,0045	1,34	0,40	0,0050	1,05	0,800	0,040	0,01960	4,85	0,24
0,130	0,0065	0,0045	1,00	0,40	0,0030	0,89	0,600	0,020	0,00900	4,62	0,15
0,240	0,0065	0,0045	1,25	0,40	0,0030	0,81	0,950	0,040	0,02300	3,96	0,17
0,220	0,0065	0,0045	1,36	0,40	0,0038	0,93	0,900	0,045	0,02110	4,09	0,20
0,175	0,0065	0,0045	1,08	0,40	0,0041	0,82	0,670	0,015	0,01270	3,83	0,09
0,230	0,0065	0,0045	1,20	0,40	0,0050	0,80	0,825	0,045	0,02000	3,59	0,20
0,227	0,0065	0,0045	1,18	0,40	0,0041	0,79	0,900	0,035	0,01670	3,96	0,15
0,265	0,0065	0,0045	1,07	0,40	0,0028	0,66	1,050	0,040	0,00810	3,96	0,15
р. Ньюжа (модель) (1980) [39]											
0,129	0,0011	–	0,53	0,12	0,0056	0,47	0,680	0,010	0,00290	5,27	0,08

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,119	0,0012	–	0,59	0,14	0,0056	0,54	0,600	0,025	0,00250	5,04	0,21
0,170	0,0012	–	0,60	0,14	0,0056	0,46	0,800	0,014	0,00150	4,71	0,08
0,070	0,0006	–	0,41	0,07	0,0056	0,49	–	0,032	0,00110	–	0,46
0,160	0,0011	–	0,56	0,12	0,0056	0,45	0,800	0,065	0,00170	5,00	0,41
0,130	0,0009	–	0,50	0,10	0,0056	0,45	0,750	0,065	0,00080	5,77	0,50
0,130	0,0018	–	0,56	0,21	0,0056	0,50	0,850	0,020	0,00120	6,54	0,15
0,130	0,0013	–	0,60	0,15	0,0056	0,53	0,600	0,040	0,00190	4,62	0,31
0,110	0,0010	–	0,59	0,12	0,0056	0,57	1,000	0,020	0,00200	9,09	0,18
0,120	0,0020	–	0,54	0,22	0,0056	0,50	0,600	0,030	0,00130	5,00	0,25
0,140	0,0012	–	0,54	0,13	0,0056	0,46	1,000	0,025	0,00094	7,14	0,18
0,090	0,0019	–	0,46	0,21	0,0056	0,49	0,450	0,050	0,00080	5,00	0,56
0,140	0,0016	–	0,40	0,19	0,0056	0,34	0,909	0,055	0,00027	6,49	0,39
0,160	0,0018	–	0,57	0,21	0,0056	0,46	0,660	0,015	0,00130	4,13	0,09
0,120	0,0018	–	0,47	0,21	0,0056	0,43	0,750	0,035	0,00110	6,25	0,29
0,160	0,0011	–	0,56	0,13	0,0056	0,45	–	0,025	0,00170	–	0,16
0,130	0,0016	–	0,50	0,18	0,0056	0,44	0,700	0,045	0,00073	5,38	0,35
р. Хара-Мурин (модель) (1985) [45]											
0,045	0,0025	–	0,35	0,25	0,0056	0,53	–	0,009	0,00250	–	0,20

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,060	0,0031	–	0,54	0,27	0,0056	0,70	–	0,010	0,00660	–	0,17
0,050	0,0035	–	0,68	0,29	0,0056	0,96	–	0,010	0,00800	–	0,20
0,050	0,0032	–	0,58	0,28	0,0056	0,82	–	0,010	0,01000	–	0,20
0,055	0,0029	–	0,57	0,26	0,0056	0,78	–	0,005	0,00400	–	0,09
0,067	0,0026	–	0,61	0,25	0,0056	0,76	–	0,017	0,00570	–	0,25
0,070	0,0037	–	0,61	0,30	0,0056	0,74	–	0,015	0,00570	–	0,21
0,055	0,0031	–	0,57	0,27	0,0056	0,78	–	0,010	0,00660	–	0,18
0,045	0,0028	–	0,51	0,26	0,0056	0,76	–	0,011	0,00400	–	0,24
0,040	0,0025	–	0,48	0,25	0,0056	0,76	–	0,020	0,00330	–	0,50
0,045	0,0024	–	0,54	0,24	0,0056	0,81	–	0,006	0,00500	–	0,13
0,038	0,0041	–	0,61	0,31	0,0056	1,01	–	0,005	0,00950	–	0,13
0,060	0,0025	–	0,61	0,25	0,0056	0,80	–	0,008	0,00570	–	0,13
0,045	0,0027	–	0,66	0,26	0,0056	1,00	–	0,007	0,00660	–	0,16
0,050	0,0039	–	0,43	0,31	0,0056	0,61	–	0,012	0,00310	–	0,24
0,060	0,0031	–	0,54	0,27	0,0056	0,70	–	0,009	0,00770	–	0,15
0,060	0,0029	–	0,66	0,26	0,0056	0,86	–	0,010	0,00550	–	0,17
0,043	0,0029	–	0,64	0,26	0,0056	0,98	–	0,006	0,00910	–	0,14
0,045	0,0025	–	0,64	0,25	0,0056	0,96	–	0,006	0,00710	–	0,13

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,060	0,0031	–	0,66	0,27	0,0056	0,86	–	0,008	0,00590	–	0,13
0,045	0,0029	–	0,65	0,26	0,0056	0,97	–	0,005	0,01000	–	0,11
р. Утулик (модель) (1990) [44]											
0,050	0,0037	–	0,68	0,30	0,0054	0,97	–	0,008	0,00860	–	0,16
0,042	0,0036	–	0,50	0,29	0,0054	0,78	–	0,010	0,00330	–	0,24
0,037	0,0032	–	0,64	0,28	0,0054	1,05	–	0,005	0,01050	–	0,14
0,030	0,0029	–	0,47	0,26	0,0054	0,87	–	0,010	0,00440	–	0,33
0,035	0,0025	–	0,50	0,25	0,0054	0,85	–	0,015	0,00950	–	0,43
0,050	0,0030	–	0,56	0,27	0,0054	0,79	–	0,005	0,00640	–	0,10
0,050	0,0041	–	0,63	0,31	0,0054	0,89	–	0,010	0,00740	–	0,20
0,060	0,0031	–	0,63	0,27	0,0054	0,81	–	0,011	0,01330	–	0,18
0,045	0,0032	–	0,53	0,28	0,0054	0,79	–	0,015	0,00250	–	0,33
0,045	0,0030	–	0,50	0,27	0,0054	0,75	–	0,010	0,00910	–	0,22
0,040	0,0034	–	0,62	0,29	0,0054	0,99	–	0,010	0,01000	–	0,25
р. Аносовка (модель) (1992) [43]											
0,035	0,0015	–	0,42	0,18	0,0069	0,72	–	0,010	0,00230	–	0,29
0,020	0,0021	–	0,40	0,22	0,0069	0,90	–	0,010	0,00400	–	0,50
В.Ф. Пушкарев (1948) [59]											

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,102	0,0024	–	0,62	0,24	0,0010	0,62	0,570	0,012	0,00240	5,59	0,12
0,092	0,0024	–	0,60	0,24	0,0013	0,63	0,800	0,011	0,00370	8,70	0,12
0,099	0,0024	–	0,62	0,24	0,0013	0,63	0,720	0,011	0,00310	7,27	0,11
0,091	0,0024	–	0,62	0,24	0,0017	0,66	0,580	0,010	0,00500	6,37	0,11
0,095	0,0024	–	0,63	0,24	0,0017	0,65	0,630	0,014	0,00380	6,63	0,15
0,100	0,0024	–	0,66	0,24	0,0017	0,67	0,500	0,010	0,00510	5,00	0,10
0,112	0,0024	–	0,71	0,24	0,0017	0,67	0,660	0,021	0,00420	5,89	0,19
0,084	0,0024	–	0,60	0,24	0,0025	0,66	0,860	0,011	0,00370	10,24	0,13
0,098	0,0024	–	0,55	0,24	0,0025	0,56	0,500	0,009	0,00190	5,10	0,09
0,086	0,0024	–	0,64	0,24	0,0025	0,70	0,570	0,010	0,00540	6,63	0,12
0,094	0,0024	–	0,69	0,24	0,0025	0,72	0,440	0,012	0,00610	4,68	0,13
0,102	0,0024	–	0,70	0,24	0,0025	0,70	0,600	0,015	0,00350	5,88	0,15
0,102	0,0024	–	0,60	0,24	0,0025	0,59	0,880	0,015	0,00170	8,63	0,15
0,079	0,0017	–	0,51	0,20	0,0010	0,58	0,560	0,009	0,00320	7,05	0,11
0,087	0,0017	–	0,57	0,20	0,0010	0,61	0,450	0,013	0,00340	5,19	0,15
0,097	0,0017	–	0,56	0,20	0,0010	0,57	0,460	0,014	0,00250	4,75	0,15
0,103	0,0017	–	0,59	0,20	0,0010	0,59	0,420	0,013	0,00280	4,09	0,13
0,111	0,0017	–	0,65	0,20	0,0010	0,62	0,520	0,018	0,00410	4,68	0,16

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,081	0,0017	–	0,53	0,20	0,0013	0,59	0,400	0,010	0,00280	4,92	0,12
0,092	0,0017	–	0,57	0,20	0,0013	0,60	0,410	0,010	0,00380	4,46	0,11
0,098	0,0017	–	0,57	0,20	0,0013	0,58	0,490	0,013	0,00290	5,01	0,13
0,106	0,0017	–	0,62	0,20	0,0013	0,61	0,570	0,016	0,00390	5,38	0,15
0,104	0,0017	–	0,61	0,20	0,0013	0,61	0,600	0,018	0,00380	5,75	0,17
0,076	0,0017	–	0,54	0,20	0,0017	0,62	0,530	0,010	0,00290	6,99	0,13
0,081	0,0017	–	0,53	0,20	0,0017	0,59	0,430	0,009	0,00240	5,30	0,11
0,088	0,0017	–	0,57	0,20	0,0017	0,62	0,450	0,013	0,00330	5,11	0,15
0,096	0,0017	–	0,58	0,20	0,0017	0,59	0,400	0,012	0,00340	4,18	0,13
0,103	0,0017	–	0,65	0,20	0,0017	0,64	0,560	0,018	0,00470	5,44	0,17
0,101	0,0017	–	0,67	0,20	0,0017	0,67	0,660	0,020	0,00470	6,57	0,20
0,085	0,0017	–	0,52	0,20	0,0017	0,57	0,790	0,013	0,00220	9,34	0,16
0,093	0,0017	–	0,54	0,20	0,0017	0,57	0,500	0,013	0,00260	5,38	0,13
0,096	0,0017	–	0,57	0,20	0,0017	0,59	0,450	0,013	0,00270	4,71	0,13
0,070	0,0017	–	0,51	0,20	0,0025	0,61	0,480	0,008	0,00200	6,85	0,11
0,078	0,0017	–	0,54	0,20	0,0025	0,62	0,410	0,010	0,00280	5,29	0,13
Г.П. Уильямс (1970) [143]											
0,216	0,0014	0,0015	0,95	0,16	0,0079	0,65	0,910	0,030	0,00930	4,21	0,14

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,214	0,0014	0,0015	1,08	0,16	0,0101	0,74	0,780	0,038	0,01010	3,64	0,18
0,088	0,0014	0,0015	0,69	0,16	0,0055	0,74	0,460	0,014	0,00550	5,23	0,16
0,152	0,0014	0,0015	0,48	0,16	0,0016	0,39	1,060	0,014	0,00041	6,97	0,09
0,150	0,0014	0,0015	0,51	0,16	0,0019	0,42	0,980	0,014	0,00037	6,53	0,09
0,154	0,0014	0,0015	0,53	0,16	0,0023	0,43	1,040	0,020	0,00081	6,75	0,13
0,153	0,0014	0,0015	0,56	0,16	0,0026	0,46	0,970	0,022	0,00094	6,34	0,14
0,152	0,0014	0,0015	0,60	0,16	0,0030	0,49	0,770	0,018	0,00110	5,07	0,12
0,150	0,0014	0,0015	0,71	0,16	0,0046	0,58	0,660	0,024	0,00690	4,40	0,16
0,154	0,0014	0,0015	0,82	0,16	0,0064	0,67	0,660	0,024	0,00840	4,29	0,16
0,216	0,0014	0,0015	0,62	0,16	0,0021	0,43	0,900	0,026	0,00071	4,17	0,12
0,220	0,0014	0,0015	0,90	0,16	0,0046	0,61	0,720	0,032	0,00540	3,27	0,15
0,090	0,0014	0,0015	0,46	0,16	0,0016	0,48	2,710	0,012	0,00052	30,11	0,13
0,090	0,0014	0,0015	0,47	0,16	0,0018	0,50	1,770	0,012	0,00082	19,67	0,13
0,091	0,0014	0,0015	0,48	0,16	0,0020	0,51	1,460	0,016	0,00046	16,04	0,18
0,092	0,0014	0,0015	0,50	0,16	0,0021	0,53	1,310	0,020	0,00110	14,24	0,22
0,093	0,0014	0,0015	0,51	0,16	0,0021	0,53	1,100	0,012	0,00150	11,83	0,13
0,090	0,0014	0,0015	0,53	0,16	0,0024	0,56	1,070	0,016	0,00082	11,89	0,18
0,090	0,0014	0,0015	0,55	0,16	0,0027	0,59	0,700	0,016	0,00230	7,78	0,18

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,088	0,0014	0,0015	0,58	0,16	0,0032	0,62	0,730	0,026	0,00360	8,30	0,30
0,088	0,0014	0,0015	0,61	0,16	0,0040	0,65	0,610	0,020	0,00480	6,93	0,23
0,088	0,0014	0,0015	0,69	0,16	0,0051	0,74	0,550	0,022	0,00810	6,25	0,25
0,090	0,0014	0,0015	0,76	0,16	0,0056	0,81	0,400	0,050	0,00760	4,44	0,56
0,095	0,0014	0,0015	0,79	0,16	0,0064	0,82	0,460	0,038	0,01170	4,84	0,40
0,154	0,0014	0,0015	0,53	0,16	0,0014	0,43	1,130	0,032	0,00052	7,34	0,21
0,158	0,0014	0,0015	0,54	0,16	0,0017	0,43	0,850	0,020	0,00055	5,38	0,13
0,154	0,0014	0,0015	0,58	0,16	0,0022	0,47	0,760	0,020	0,00061	4,94	0,13
0,158	0,0014	0,0015	0,62	0,16	0,0025	0,50	0,610	0,050	0,00220	3,86	0,32
0,154	0,0014	0,0015	0,67	0,16	0,0031	0,54	0,670	0,050	0,00190	4,35	0,32
0,155	0,0014	0,0015	0,79	0,16	0,0042	0,64	0,550	0,050	0,00660	3,55	0,32
0,214	0,0014	0,0015	0,58	0,16	0,0013	0,40	1,130	0,026	0,00050	5,28	0,12
0,218	0,0014	0,0015	0,61	0,16	0,0018	0,41	0,790	0,024	0,00066	3,62	0,11
0,216	0,0014	0,0015	0,71	0,16	0,0027	0,49	1,370	0,046	0,00110	6,34	0,21
0,088	0,0014	0,0015	0,54	0,16	0,0021	0,58	0,730	0,015	0,00100	8,30	0,17
0,088	0,0014	0,0015	0,62	0,16	0,0033	0,67	—	0,020	0,00280	—	0,23
0,150	0,0014	0,0015	0,54	0,16	0,0010	0,44	1,110	0,015	0,00032	7,40	0,10
0,152	0,0014	0,0015	0,54	0,16	0,0014	0,44	0,940	0,020	0,00049	6,18	0,13

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,152	0,0014	0,0015	0,69	0,16	0,0028	0,56	1,040	0,035	0,00120	6,84	0,23
0,148	0,0014	0,0015	0,82	0,16	0,0045	0,68	0,770	0,040	0,00610	5,20	0,27
0,211	0,0014	0,0015	0,50	0,16	0,0006	0,34	1,140	0,020	0,00015	5,40	0,09
0,208	0,0014	0,0015	0,58	0,16	0,0008	0,40	1,070	0,020	0,00032	5,14	0,10
0,216	0,0014	0,0015	0,59	0,16	0,0015	0,41	0,940	0,025	0,00020	4,35	0,12
0,215	0,0014	0,0015	0,62	0,16	0,0017	0,42	1,100	0,035	0,00057	5,12	0,16
0,215	0,0014	0,0015	0,78	0,16	0,0028	0,54	0,940	0,040	0,00120	4,37	0,19
0,225	0,0014	0,0015	0,54	0,16	0,0010	0,36	1,100	0,020	0,00017	4,89	0,09
0,215	0,0014	0,0015	0,56	0,16	0,0009	0,38	1,310	0,040	0,00017	6,09	0,19
0,215	0,0014	0,0015	0,59	0,16	0,0012	0,40	1,280	0,040	0,00024	5,95	0,19
0,210	0,0014	0,0015	0,63	0,16	0,0019	0,44	0,760	0,045	0,00035	3,62	0,21
0,205	0,0014	0,0015	0,67	0,16	0,0021	0,47	0,910	0,055	0,00087	4,44	0,27
В.Н. Гончаров (1938) [11]											
0,100	0,0013	–	0,64	0,15	–	0,65	0,251	0,014	0,00480	2,51	0,14
0,100	0,0013	–	0,84	0,15	–	0,85	0,411	0,026	0,01250	4,11	0,26
0,100	0,0015	–	0,66	0,18	–	0,67	0,231	0,017	0,00670	2,31	0,17
0,100	0,0015	–	0,73	0,18	–	0,74	0,220	0,021	0,00900	2,20	0,21
0,100	0,0015	–	0,83	0,18	–	0,84	0,319	0,022	0,01420	3,19	0,22

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,100	0,0015	–	0,97	0,18	–	0,98	0,343	0,034	0,01630	3,43	0,34
0,100	0,0015	–	1,11	0,18	–	1,12	0,340	0,041	0,02210	3,40	0,41
0,100	0,0018	–	0,67	0,21	–	0,68	0,509	0,016	0,00670	5,09	0,16
0,100	0,0018	–	0,79	0,21	–	0,80	0,480	0,020	0,01040	4,80	0,20
0,100	0,0018	–	0,90	0,21	–	0,91	0,409	0,022	0,01740	4,09	0,22
0,100	0,0018	–	1,02	0,21	–	1,03	0,390	0,032	0,01460	3,90	0,32
0,100	0,0018	–	1,13	0,21	–	1,14	0,400	0,025	0,02280	4,00	0,25
0,100	0,0019	–	0,77	0,21	–	0,78	0,309	0,019	0,01360	3,09	0,19
0,100	0,0019	–	1,06	0,21	–	1,07	0,431	0,031	0,02390	4,31	0,31
0,100	0,0022	–	0,75	0,23	–	0,76	0,601	0,013	0,01020	6,01	0,13
0,100	0,0022	–	0,90	0,23	–	0,91	0,401	0,024	0,01520	4,01	0,24
0,100	0,0022	–	0,97	0,23	–	0,98	0,401	0,027	0,01750	4,01	0,27
0,100	0,0022	–	1,06	0,23	–	1,07	0,349	0,032	0,02120	3,49	0,32
0,100	0,0022	–	1,24	0,23	–	1,25	0,391	0,034	0,03300	3,91	0,34
0,100	0,0023	–	0,78	0,24	–	0,79	0,239	0,021	0,01090	2,39	0,21
0,100	0,0023	–	0,91	0,24	–	0,92	0,310	0,025	0,01270	3,10	0,25
0,100	0,0023	–	1,09	0,24	–	1,10	0,350	0,031	0,01760	3,50	0,31
0,100	0,0025	–	0,69	0,25	–	0,70	0,301	0,011	0,00970	3,01	0,11

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,100	0,0025	–	0,74	0,25	–	0,75	0,420	0,020	0,00780	4,20	0,20
0,100	0,0025	–	0,97	0,25	–	0,98	0,271	0,023	0,02300	2,71	0,23
0,100	0,0025	–	0,98	0,25	–	0,99	0,270	0,020	0,01950	2,70	0,20
0,100	0,0025	–	1,07	0,25	–	1,08	0,300	0,030	0,03130	3,00	0,30
0,100	0,0025	–	1,25	0,25	–	1,26	0,319	0,028	0,03760	3,19	0,28
0,100	0,0025	–	0,87	0,25	–	0,88	0,361	0,022	0,00990	3,61	0,22
0,200	0,0025	–	1,16	0,25	–	0,83	0,508	0,040	0,02290	2,54	0,20
0,200	0,0025	–	1,27	0,25	–	0,91	0,451	0,046	0,02890	2,26	0,23
0,200	0,0025	–	1,34	0,25	–	0,96	0,561	0,050	0,03320	2,81	0,25
0,100	0,0029	–	1,04	0,26	–	1,05	0,370	0,015	0,02720	3,70	0,15
0,100	0,0030	–	0,76	0,27	–	0,77	–	0,020	0,00330	–	0,20
0,100	0,0030	–	0,87	0,27	–	0,88	0,500	0,020	0,01480	5,00	0,20
0,100	0,0030	–	0,95	0,27	–	0,96	0,320	0,025	0,01700	3,20	0,25
0,100	0,0030	–	1,02	0,27	–	1,03	0,400	0,025	0,01520	4,00	0,25
0,100	0,0032	–	0,70	0,28	–	0,71	0,598	0,019	0,00220	5,98	0,19
0,100	0,0032	–	0,76	0,28	–	0,77	0,750	0,010	0,00970	7,50	0,10
0,100	0,0032	–	0,85	0,28	–	0,86	0,690	0,014	0,01960	6,90	0,14
0,100	0,0032	–	0,95	0,28	–	0,96	0,411	0,019	0,02270	4,11	0,19

$H, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d_{50}, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$w, \text{ м/с}$	I	Fr	$l_r, \text{ м}$	$h_r, \text{ м}$	$C_r, \text{ м/с}$	$\frac{l_r}{H}$	$\frac{h_r}{H}$
0,100	0,0035	–	0,96	0,29	–	0,97	0,360	0,031	0,01300	3,60	0,31
Х.П. Гай, Д.Б. Саймонс и И.В. Ричардсон (1981) [108]											
0,317	0,0009	–	0,62	0,10	0,0004	0,35	1,097	0,049	0,00075	3,46	0,15
0,162	0,0009	–	0,55	0,10	0,0013	0,44	0,884	0,018	0,00116	5,47	0,11
0,305	0,0009	–	0,64	0,10	0,0014	0,37	1,067	0,055	0,00104	3,50	0,18
0,171	0,0009	–	0,56	0,10	0,0015	0,43	1,006	0,024	0,00104	5,89	0,14
0,284	0,0009	–	0,67	0,10	0,0018	0,40	1,585	0,085	0,00099	5,59	0,30
0,140	0,0009	–	0,57	0,10	0,0019	0,49	1,189	0,037	0,00139	8,48	0,26
0,338	0,0009	–	0,77	0,10	0,0028	0,42	2,012	0,104	0,00157	5,95	0,31
0,317	0,0009	–	0,82	0,10	0,0031	0,46	1,768	0,095	0,00260	5,58	0,30
0,180	0,0009	–	0,65	0,10	0,0034	0,49	1,372	0,058	0,00255	7,63	0,32
0,311	0,0009	–	0,85	0,10	0,0036	0,49	1,920	0,091	0,00336	6,18	0,29
0,280	0,0009	–	0,92	0,10	0,0039	0,56	2,236	0,098	0,00348	7,97	0,35
0,174	0,0009	–	0,75	0,10	0,0043	0,57	1,798	0,052	0,00348	10,35	0,30
0,271	0,0009	–	0,95	0,10	0,0044	0,58	1,463	0,070	0,00674	5,39	0,26

Таблица В.4 – Лабораторный эксперимент в 100-метровом гидравлическом лотке (единицы модели) – бесструктурный транспорт донных наносов (2004) [42]

H , м	V , м/с	I	Fr	q , м ³ /с/м	q_T , м ³ /с/м	q_T , кг/м/с	$\frac{q_T}{q}$, м ³ /м ³	$\frac{q_T}{q}$, кг/м ³	$\rho_{T_{рыкл}}$, кг/м ³
0,01	0,16	0,0046	0,51	0,00165	0,0000000	0,0000	0,000000	0,00	
0,01	0,17	0,0045	0,46	0,00238	0,0000002	0,0004	0,000063	0,17	1611
0,02	0,22	0,0045	0,56	0,0036	0,0000007	0,0018	0,000189	0,50	1692
0,02	0,20	0,0045	0,46	0,0038	0,0000008	0,0020	0,000199	0,53	1667
0,02	0,26	0,0045	0,57	0,0054	0,0000015	0,0039	0,000273	0,72	1679
0,03	0,35	0,0045	0,69	0,009	0,0000032	0,0086	0,000361	0,96	1693
0,03	0,41	0,0045	0,76	0,0122	0,0000049	0,0130	0,000402	1,07	1655
0,03	0,50	0,0046	0,87	0,017	0,0000083	0,0220	0,000488	1,29	1728
0,04	0,49	0,0045	0,82	0,0177	0,0000087	0,0230	0,000490	1,30	1701
0,04	0,51	0,0045	0,81	0,0204	0,0000109	0,0290	0,000536	1,42	1727
0,05	0,56	0,0047	0,80	0,0278	0,0000177	0,0470	0,000638	1,69	1692
0,06	0,57	0,0047	0,74	0,0344	0,0000260	0,0690	0,000757	2,01	1702

**Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации баз
данных**



Рисунок Г.1 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

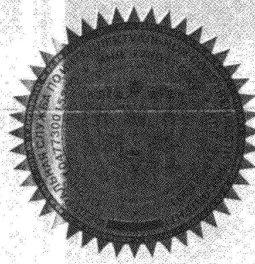
о государственной регистрации базы данных

№ 2017620878

Данные измерений гидравлических характеристик
транспорта донных наносов в гидравлических моделях
горных рек и лотковых экспериментах

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Государственный гидрологический институт"*
(RU)

Авторы: *Копалиани Зураб Дмитриевич (RU),
Петровская Ольга Андреевна (RU)*



Заявка № 2017620307

Дата поступления 10 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных 10 августа 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Рисунок Г.2 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878



Рисунок Г.3 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620958



Рисунок Г.4 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621415



Рисунок Г.5 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621406