

STUDYING THE GRANULAR ROUGHNESS OF RIVER CHANNELS BOTTOM

G. L. Gladkov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The main tasks of the dynamics of channel flows, the solution of which depends on the quality of hydraulic calculations and the reliability of channel forecasts in rivers with moving soil of bottom sediments, are the problems of estimating energy losses along the length and determining the flow rate of channel deposits in the natural river channels. In the river flows, these issues are interconnected through the mechanism of interaction between the stream and the deformable riverbed. By nowadays, it has been possible to obtain a large number of calculated recommendations in the field of sediment transport modelling. Considering that a universal solution in river hydraulics has not been established yet, this problem remains relevant. The performed work is devoted to the issues of assessing the hydraulic resistance of the channel and improving the model of sediment transport in rivers using the database of field measurements on rivers. The results obtained during the research have improved the quality of sediment transport modelling. In the event that the purpose of hydraulic calculations is to compute the free surface marks along the length, then on the rivers sections where the large bottom sediments predominate and sediment transport is limited, preference should be given to the calculated dependencies having the structure of A.P. Zegzhd formula. On the rivers with fine-grained soils, it is proposed to use in the calculations the dependencies constructed on the basis of the established relation between the Chezy coefficient and the current velocity. When the purpose of hydraulic calculations is to forecast channel reformation on a river section, it is recommended to use the modified L. van Rijn formula to calculate channel sediment discharge. At the same time, it is recommended to evaluate the granular bottom roughness in the sediment flow formula using the Manning – Strickler and A. P. Zegzhd formulas.

Keywords: morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water discharge, sediment transport, Sediment discharge, energy loss gradient, Chezy coefficient, shear stress on the bottom, Reynolds number, channel reformation.

For citation:

Gladkov, Gennadii L. "Studying the granular roughness of river channels bottom." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.

УДК 556.536

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРНИСТОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ДНА РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Г. Л. Гладков

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Выполнено исследование основных задач динамики русловых потоков, от решения которых зависит качество гидравлических расчетов и надежность русловых прогнозов в реках с подвижными грунтами донных отложений, таких как оценка потерь энергии по длине и определение расхода русловых наносов в естественных руслах рек. В речных потоках эти вопросы взаимосвязаны между собой через механизм взаимодействия потока и деформируемого русла реки. К настоящему времени удалось получить большое количество расчетных рекомендаций в области моделирования транспорта наносов. Учитывая, что универсального решения в речной гидравлике до настоящего времени не установлено, данная проблема остается по-прежнему актуальной. Выполненная работа посвящена вопросам оценки гидравлического сопротивления русла и совершенствованию модели транспорта наносов в реках с использованием базы данных натурных измерений на реках. Полученные в ходе проведения исследований результаты позволили улучшить качество моделирования транспорта наносов. В результате прове-

денных исследований был сделан следующий вывод: в том случае, если целью гидравлических расчетов является вычисление отметок свободной поверхности по длине, то на участках рек, где преобладают крупные донные отложения и транспорт наносов ограничен, предпочтение следует отдать расчетным зависимостям, имеющим структуру формулы А. П. Зегжды. На реках с мелкозернистыми грунтами предлагается использовать в расчетах зависимости, построенные на основе установленной связи коэффициента Шези от скорости течения. Когда целью гидравлических расчетов является прогноз русловых переформирований на участке реки, для вычисления расхода русловых наносов рекомендуется использовать модифицированную формулу Л. ван Рейна. При этом оценку зернистой шероховатости дна в формуле расхода наносов рекомендуется выполнять с помощью формул Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды.

Ключевые слова: морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, градиент потерь энергии, коэффициент Шези, касательное напряжение на дне, число Рейнольдса, русловые переформирования.

Для цитирования:

Гладков Г. Л. Исследование зернистой шероховатости дна речных русел / Г. Л. Гладков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 336–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.

Введение (Introduction)

В отечественной и зарубежной практике до настоящего времени для определения расхода русловых наносов широко применяются расчетные зависимости, имеющие структуру формулы Е. Мейер-Петера и Р. Мюллера [1], в которой величина расхода наносов g_s вычисляется в виде функции, представляющей разность касательных напряжений на дне потока $g_s(\mu\Theta - \Theta_c)^m$. При этом величина коэффициента подвижности Θ частиц речного аллювия на дне потока находится в зависимости от динамической скорости потока как $\Theta \equiv \tau_* = \rho(U_*^2) / (\rho_s - \rho)gd$, а критическое значение коэффициента подвижности Θ_c находится обычно по графику Шильдса [2] в зависимости от числа Рейнольдса: $Re_{*c} = U_{*c}d/\nu$.

Исходные зависимости для нахождения Θ_c , отвечающих началу сдвига частиц на дне потока, были получены по данным экспериментов, проводимых с однородным грунтом при перемещении частиц по безгрядовому дну. Поэтому в реальных условиях приходится корректировать значения величины влекущей силы с использованием так называемого «ripple-фактора» μ .

В расчетах естественных речных потоков с неоднородным грунтом приходится корректировать величину критического значения коэффициента подвижности, выделяя «*hiding/exposure-factor*» с использованием выражения вида $\Theta_{ci} = \xi_i \Theta_{cm}$. Здесь Θ_{ci} и Θ_{cm} , соответственно, критические значения коэффициента подвижности для i -й фракции грунта и для частиц грунта средней крупности в смеси. С помощью такого подхода удастся учесть различную вероятность сдвига частиц грунта различной крупности в смеси на дне потока. Для вычисления этих параметров имеет ряд расчетных рекомендаций [3]–[6].

В работах авторов [7], [8], по материалам измерений расхода влекомых наносов на гидрологических постах рек с различной крупностью донных отложений, было выполнено тестирование формул расхода влекомых наносов. Тестовые расчеты выполнялись для среднего диаметра частиц и пофракционно по формулам Мейер-Петера и Мюллера [1], Г. Эйнштейна [9], Л. ван Рейна [10], а также ряда других авторов — всего было выполнено тридцать различных моделей расчета. Для пофракционного расчета расхода наносов использовались известные модификации формул, полученные Дж. Рибберинком [4] и Б. Зенгеном [6].

Тестовые расчеты показали, что из всех рассмотренных вариантов наилучшие результаты сопоставления с натурными данными были получены на основе формулы Л. ван Рейна [10], полученной автором для вычисления расхода мелкозернистых наносов в реках. Модификация данной зависимости, выполненная в работах [7], [8] с использованием материалов экспериментальных исследований В. С. Кнороза [11], позволила расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнородного грунта донных отложений в реках.

Затруднения для использования полученной методики вычисления расхода русловых наносов заключаются в следующем. Во-первых, для определения величины влекущей силы при вычислении расхода наносов необходимо иметь сведения об измеренных уклонах свободной поверхности либо вычислять величину потерь энергии по длине с использованием одной из формул коэффициента Шези. При выполнении тестовых расчетов в работах [7], [8] имелись сведения об измеренных уклонах, что позволило получить достаточно высокую корреляцию рассчитанных и измеренных значений расходов наносов на гидрологических постах.

В реальной практике при моделировании русловых переформирований в реках значения отметок свободной поверхности и скорости течения воды находятся расчетным путем на каждом шаге вычислений при решении уравнения движения воды. Рекомендации по выбору соответствующей формулы коэффициента Шези приводятся в работе [8], однако непосредственно приведенные зависимости имеют определенные погрешности, что, в конечном итоге, сказывается на надежности определения искомой величины расхода наносов.

Во-вторых, для использования рекомендованной формулы расхода наносов в расчетной практике в процессе вычислений необходимо применять определенную методику для выделения грядовой составляющей коэффициента Шези из общей величины потерь энергии по длине. В работе [8] параметры донных гряд и величина сопротивления движению воды, вызываемая *донными грядами*, находятся по рекомендациям М. Ялина [5], [6]. В целом использование данных рекомендаций дает вполне удовлетворительный результат, однако сама методика представляется достаточно сложной и, безусловно, вносит дополнительные погрешности при вычислении величины расхода наносов.

На данном этапе работы предпринимается попытка исключить промежуточные этапы вычислений, связанные с выделением грядовой составляющей потерь энергии по длине, а величину коэффициента подвижности в формуле расхода наносов находить с помощью коэффициента Шези по известной формуле зернистой шероховатости.

Учитывая, что в расчетной практике используется достаточно большое количество таких формул, в настоящей работе выполняется их тестовая оценка и разрабатываются рекомендации по совершенствованию методики вычисления параметров транспорта наносов в реках.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В инженерной практике для оценки сопротивления зернистой шероховатости в руслах рек до настоящего времени широко применяется эмпирическая расчетная зависимость в виде формулы Маннинга – Штриклера [12]:

$$C_d/\sqrt{g} = 6,67(R/d_{50})^{1/6}. \quad (1)$$

Вторая группа расчетных зависимостей построена на основе логарифмической формулы А. П. Зегжды [13], которая была получена автором исследования в результате проведения экспериментов в открытых лотках с наклеенной шероховатостью:

$$C_d/\sqrt{g} = 5,66 \lg(R/\Delta) + 6,01, \quad (2)$$

где Δ — высота выступов шероховатости, принимаемая, соответственно, равной $\Delta = 1,6d_{50}$ для песчаных частиц, $\Delta = 1,3d_{50}$ для частиц мелкого гравия и $\Delta = d_{50}$ для среднего и крупного гравия.

Исследованиями гидравлического сопротивления галечного дна в натурных условиях занимался Дж. Гриффитс [14]. На участках первой группы анализируемых рек галька не двигалась, и дно было относительно ровным. На участках второй группы наблюдался транспорт наносов в форме движения донных гряд. На участках первой группы гидравлический радиус изменялся в пределах 0,12–8,99 м, а медианный диаметр донных частиц, по данным ситового анализа, колебался в пределах 0,013–0,301 м. С учетом выполненных измерений других ученых (всего 186 точек) Гриффитс получил формулу сопротивления русла с неподвижным дном, аналогичную формуле А. П. Зегжды:

$$C_d / \sqrt{g} = 5,60 \lg(R / d_{50}) + 2,15. \quad (3)$$

Исследования, выполненные также другими учеными, показали, что в естественных руслах рек величина гидравлического сопротивления движению воды оказывается существенно больше, чем было установлено в экспериментах А. П. Зегжды. При этом в речных потоках общая структура расчетной зависимости для оценки сопротивления зернистой шероховатости речного дна имеет вид формулы (2), где угловой коэффициент в уравнении регрессии оказывается примерно таким же, как это было установлено А. П. Зегждой в экспериментах, а величина свободного члена оказывается меньше, чем в гидравлическом лотке.

Согласно имеющимся материалам исследований, на реках величина свободного члена в формуле (2) изменяется в пределах от 6,01 у Зегжды (по данным измерений в лотках с закрепленной песчаной шероховатостью) до –5,3 у К. В. Гришанина [15] (по данным измерений на предгорных участках рек с галечно-валунным дном). Такая тенденция часто отмечается при попытках использования расчетных зависимостей, полученных в экспериментальных условиях для выполнения гидравлических расчетов естественных участков речных русел рек. Это связано, с одной стороны, с неоднородностью грунтов донных отложений в естественных условиях, с другой — с наличием факторов, оказывающих дополнительное сопротивление движению воды в реках.

Разнородность грунта донных отложений в реальных условиях можно учесть за счет оценки распределения крупности гранулометрического состава при установлении репрезентативного диаметра донных частиц речного аллювия. В работе Дж. Рибберинка [4], результаты которой также использовались впоследствии другими авторами [6], [7], применялся логарифмически-нормальный закон распределения крупности частиц донных отложений. Эти данные позволили определить эффективную высоту выступов шероховатости на дне потока в зависимости от среднего диаметра частиц грунта в смеси $K'_s = d_m + 1,65 S_{dm}$, где $S_{dm} = \sqrt{\sum \beta_i (d_i - d_m)^2}$.

Значительно более сложным оказывается оценить другие составляющие дополнительных гидравлических сопротивлений движению воды в реках. Природа дополнительных факторов в реальных условиях может оказаться различной. На характеристики движения воды оказывает влияние форма речного русла, наличие русловых морфологических образований: гряд, перекатов, побочней и др. На дне реки, сложенном неоднородным грунтом, могут образовываться случайные скопления из относительно более крупных частиц.

Представляются перспективными в плане совершенствования расчетного обоснования результаты исследований, в которых величина сопротивления зернистой шероховатости дна выделялась в виде функции полного сопротивления по длине потока. Дж. Гриффитс в своей работе [16] использовал материалы натурных измерений на реках с крупнозернистыми грунтами донных отложений. С привлечением данных других авторов он получил эмпирическую расчетную зависимость, в которой величина полного сопротивления по длине оказалось функционально связанной с сопротивлением зернистой шероховатости дна и величиной критического касательного напряжения на дне потока

$$\Theta_r \equiv \tau_{*r} = \tau_* - \tau_{*d} = \exp(-b\tau_*^{-m}) (\tau_* - \tau_{*d}), \quad (4)$$

где $b = 0,142$ и $m = 0,71$ — коэффициенты регрессии в формуле Гриффитса.

Кроме приведенных ранее формул коэффициента Шези, для оценки зернистой шероховатости дна в реках в настоящей работе был выполнен анализ результатов исследований Ялина [5], Энгелунда [17] и Карима [18], а также использованы результаты последних исследований в данной области [19]–[22]. Для выполнения тестовых расчетов в работе использовалась выборка исходных данных измерений на гидрологических постах, включающая одновременные измерения гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла на 41 гидрометрическом створе по 29 различным рекам. Общая характеристика используемой выборки приведена в работах [7], [8].

Результаты (Results)

На основе имеющейся выборки исходных данных было выполнено тестирование различных формул для оценки гидравлических сопротивлений в естественных руслах. Учитывая, что каждая из анализируемых расчетных зависимостей содержит эмпирические коэффициенты, значения

которых зависят от условий проведения исследований в каждом конкретном случае, эта работа проводилась в два этапа.

На первом этапе отдельные формулы для вычисления зернистой шероховатости русла были сопоставлены между собой. При таком подходе имеет место некоторая условность, так как выделить относительную долю зернистой шероховатости в чистом виде не представляется возможным, и нет ясности, какую из анализируемых в работе формул считать базовой для сравнения. В этой связи был проведен второй этап расчетов, в ходе которого вычислялись значения расходов влекомых наносов. Полученные значения сопоставлялись с соответствующими измеренными расходами наносов и, таким образом, уточнялись величины эмпирических коэффициентов в применяемых формулах коэффициента Шези. Это позволило внести определенность при оценке полученных результатов и наметить дальнейшие шаги для проведения исследований в данной области. На рис. 1 показано сопоставление результатов вычисления значений коэффициента подвижности Θ_d , рассчитанных по формулам Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды.

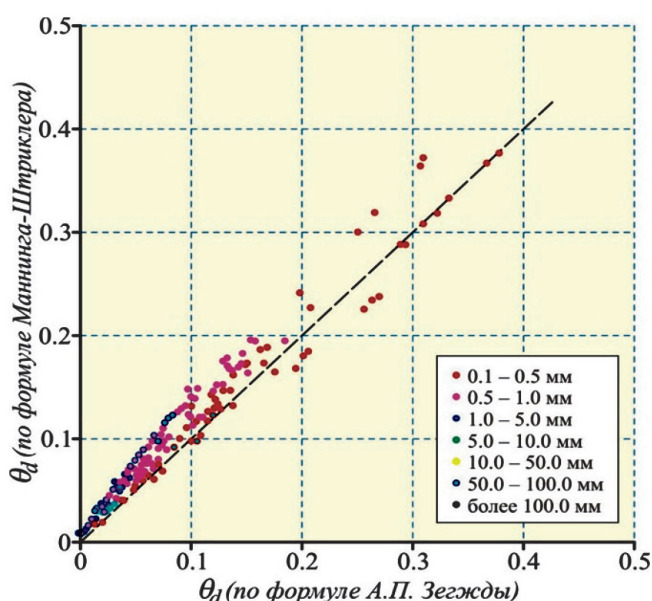


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета параметра Θ_d по формулам Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды

Полученные данные показывают, что результаты вычисления значений коэффициента подвижности по этим формулам достаточно хорошо совпадают между собой. При этом в области малых значений коэффициента подвижности, т. е. для относительно более крупных частиц, формула Маннинга – Штриклера в вычислениях дает завышенные значения Θ_d по сравнению с формулой Зегжды.

На основе выполненных расчетов с использованием имеющейся выборки исходных данных были построены графики зависимости $\Theta_d = f(\Theta)$. При этом величина Θ_d в каждом конкретном случае вычислялась по разным формулам коэффициента Шези для оценки зернистой шероховатости дна. В вычислениях использовались расчетные формулы Маннинга – Штриклера [12], Зегжды [13], Гриффитса [16], Ялина [5], Энгелунда [17] и Карима [18]. Сопоставление результатов выполненных расчетов приведено на рис. 2. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Как и следовало ожидать, наиболее близкие результаты между собой дали формулы Маннинга – Штриклера и Зегжды. При этом число значений, попавших в область $\Theta_d \geq \Theta$ по формуле Зегжды оказалось меньше, чем по формуле Штриклера. Это свидетельствует о том, что расчетная формула Зегжды при прочих равных условиях будет давать более точные результаты вычислений в области малых значений коэффициента подвижности, чем расчетная формула Штриклера.

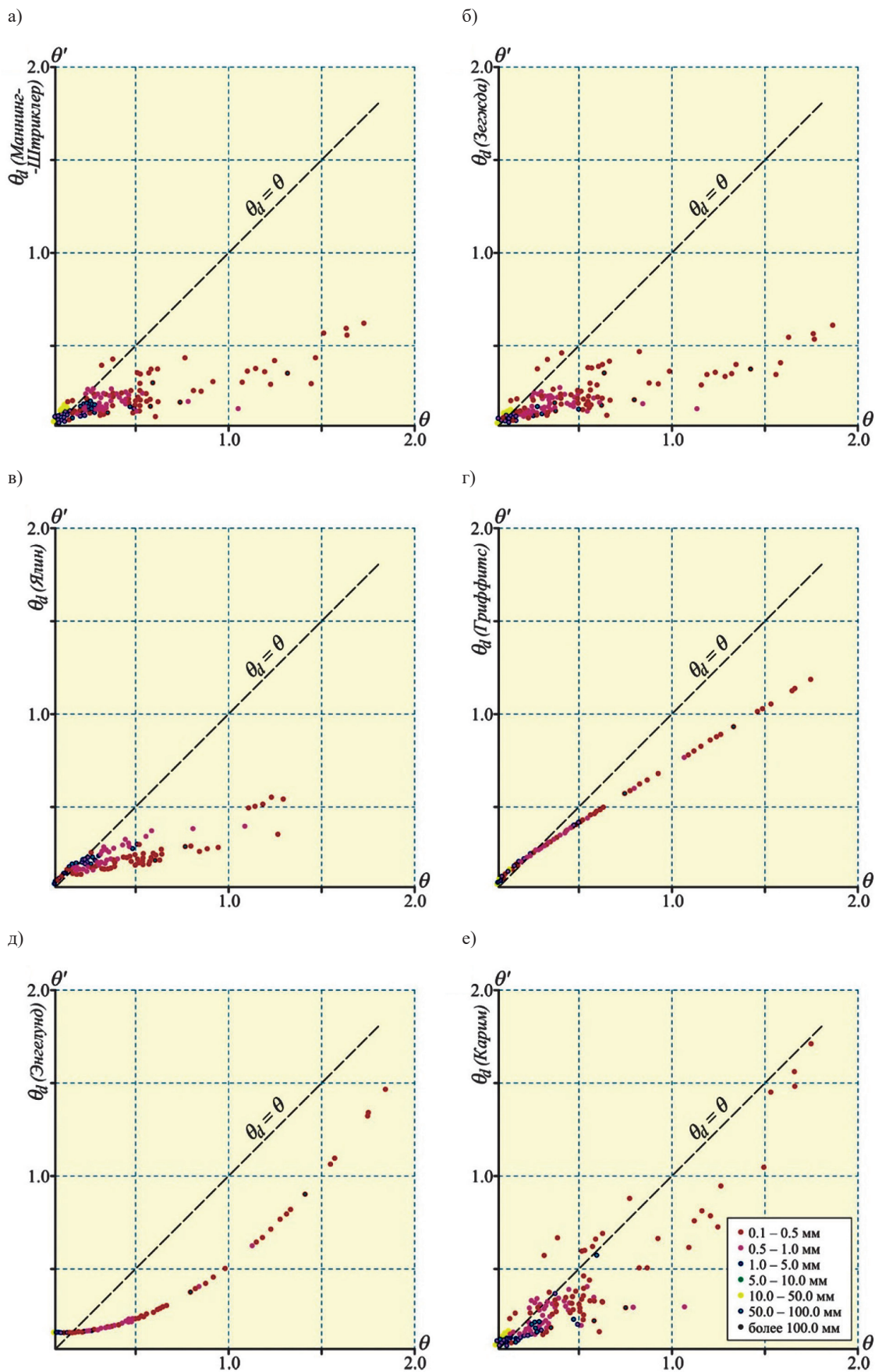


Рис. 2. Графики зависимости $\theta_d = f(\theta)$:

а — формула Маннинга – Штриклера; б — формула А. П. Зегжды; в — формула М. Ялина;
г — формула Дж. Гриффитса; д — формула Энгелунда; е — формула Карима

Результаты расчетов, выполненных с использованием методики Ялина, достаточно хорошо коррелируют с данными, полученными по первым двум формулам, однако эта методика дает также завышенные значения Θ_d в области малой подвижности частиц. При вычислении высоты гряд по Ялину используется дополнительный параметр — критическое значение коэффициента подвижности Θ_{cm} . В рассматриваемом случае его величина находилась на основе расчетной зависимости, построенной на основе экспериментальных исследований В. С. Кнороза [8], [11].

Установленная Гриффитсом аналитическая зависимость $\Theta_d = f(\Theta)$, судя по полученным данным, завышает относительную долю зернистой шероховатости. В наибольшей степени это проявляется в области больших значений коэффициента подвижности, т. е. применительно к частицам мелкой крупности. Рассчитанная величина Θ_d по этой формуле практически во всем диапазоне существенно больше значений, полученных по формулам Штриклера, Зегжды и Ялина. По всей видимости, при вычислении величины расхода наносов с использованием данной расчетной зависимости необходимо корректировать полученное автором значение свободного члена в уравнении регрессии.

График зависимости $\Theta_d = f(\Theta)$, построенный на основе вычислений по формуле Энгелунда, имеет обратную кривизну по сравнению с остальными анализируемыми формулами. Физически обосновать это трудно, и для принятия решения относительно возможного использования этой формулы в расчетах в дальнейшем необходимо привлечение дополнительных экспериментальных и натурных данных для проведения тестовых расчетов.

На графике, полученном на основе вычислений по формуле Карима, отчетливо просматриваются области, разделяющие степень подвижности мелких и относительно более крупных частиц. Это связано, по-видимому, с тем, что исходная формула Карима тестировалась по данным измерений на реках с мелкозернистыми грунтами. Но даже и для этих фракций разброс точек на графике оказался достаточно большим.

Для оценки точности вычисления расхода влекомых наносов с использованием выбранных расчетных зависимостей и последующей оценки потерь энергии по длине в работе был выполнен второй этап расчетов, в ходе которого результаты вычислений сопоставлялись с данными натурных измерений на реках.

Обсуждение (Discussion)

В качестве базовой модели, используемой для тестирования расхода наносов, применялась модифицированная формула Л. ван Рейна, описание которой приводится в работе [8]. Полученная формула записывается в виде

$$q_s = AHU Fr^{2.4} \sum_{i=1}^n \beta_i \left(\frac{1 - \sqrt{\xi_i \Theta_{ci} / \mu \Theta_i}}{\sqrt{\rho_s / \rho - 1}} \right)^{2.4}. \quad (5)$$

В ходе выполняемых вычислений значения параметра $\Theta_d = \mu \Theta_i$ определялись по всем описанным ранее расчетным формулам, что позволило в каждом конкретном случае оценить долю зернистой шероховатости и при необходимости внести необходимые коррективы при определении ее величины. Объективным критерием качества работы той или иной расчетной формулы для оценки зернистой шероховатости русла служило сопоставление рассчитанных значений величины расхода наносов с данными натурных измерений. При выполнении тестовых расчетов внимание также обращалось на то, что используемая расчетная модель содержит эмпирические коэффициенты. Учитывая, что все эти параметры взаимосвязаны между собой и каждый из них, в той или иной степени, оказывает влияние на надежность получения окончательного результата, желательно было сохранить авторскую трактовку составляющих модель блоков вычислений. К ним относятся прежде всего общая структура расчетной формулы Л. ван Рейна, полученные угловые коэффициенты регрессии, и, наконец, методика оценки *hiding*-эффекта. Эти вопросы в достаточной степени были проанализированы на предыдущем этапе исследований и к настоящему времени пока не получено аргументов, опровергающих их.

Вычисления по формулам Маннинга – Штриклера и Зегжды показали, что при использовании в расчетной формуле расхода наносов по Л. ван Рейну значения свободного члена $A = 0,001$ качество вычисления расхода наносов становится выше, чем это было получено на предыдущем этапе исследования при $A = 0,0014$. При этом расчеты, выполненные на основе формулы Штриклера, дают наилучшие результаты в авторской трактовке формулы. Величина свободного члена в формуле Зегжды получилась равной 1,0, что совпадает с результатом, полученным ранее Лимериносом.

По всем остальным расчетным формулам вычисления были выполнены для этих двух случаев, т. е. при $A = 0,0014$ и $A = 0,001$, а корректировке подлежали лишь коэффициенты пропорциональности в соответствующих формулах потерь энергии по длине при оценке доли зернистой шероховатости русла. Результаты выполненных расчетов показали, что при использовании расчетных зависимостей Гриффитса, Энгелунда и Карима для вычисления расхода влекомых наносов авторские значения эмпирических коэффициентов в этих формулах приходится корректировать с целью повышения качества вычислений.

Выводы (Summary)

Для использования полученных результатов при выполнении гидравлических расчетов и моделировании русловых переформирований в реках на основе выполненных в этой работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. При выполнении гидравлических расчетов с целью определения отметок свободной поверхности по длине реки с крупнозернистыми донными отложениями рекомендуется использовать расчетные зависимости типа Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды. При наличии измеренных уклонов свободной поверхности необходимо провести серию тестовых расчетов для уточнения величины свободного члена в исходной зависимости либо величины эффективной высоты выступов шероховатости на дне речного потока, что позволит учесть дополнительные факторы сопротивления движению воды.

2. На участках рек с подвижными мелкозернистыми грунтами донных отложений более предпочтительным оказывается использование в расчетах отметок свободной поверхности новых зависимостей гидравлического сопротивления по длине, полученных на основе установленной связи коэффициента Шези от скорости течения воды [8], [15], [23]. Структура этих формул позволяет учесть механизм обратной связи в системе *речной поток – подвижное русло* и на этой основе более надежно оценивать реакцию речного потока в виде естественных и искусственных изменений речного русла.

3. При моделировании транспорта наносов и расчете русловых деформаций в реках целесообразно использовать расчетные зависимости коэффициента Шези, полученные для оценки зернистой шероховатости донных отложений, либо зависимости вида $\Theta_d = f(\Theta)$, построенные по материалам натурных исследований. В последнем случае необходимо иметь сведения об измеренных уклонах свободной поверхности по длине реки, что позволяет выделить относительную долю зернистой шероховатости дна из полной величины потерь энергии по длине.

4. Выполненные расчеты показали, что при наличии измеренных уклонов свободной поверхности на исследуемом участке реки с подвижными грунтами донных отложений из всех рассмотренных вариантов тестовых расчетов наилучшие результаты в сопоставлении с данными измерений расхода влекомых наносов дает модифицированная формула (5) Л. ван Рейна. Величина свободного члена в этой формуле $A = 0,0014$ при использовании методики Эйнштейна – Ялина для оценки грядовой составляющей коэффициента Шези и методики Ашида – Егизарова – Зенгена [3]–[6] для пофракционного вычисления расхода разнотекучих наносов.

5. Результаты вычислений, выполненных на основе расчетных формул для оценки зернистой шероховатости дна с помощью формул Маннинга – Штриклера и А. П. Зегжды показали, что применение данных формул для определения величины коэффициента подвижности Θ_d в формуле расхода влекомых наносов может быть рекомендовано при отсутствии измерений уклона

свободной поверхности. При использовании формулы Л. ван Рейна (5) в качестве модели транспорта наносов в данном случае величина свободного члена составила $A = 0,001$. При этом формула Маннинга – Штриклера может использоваться в авторской трактовке, а в формуле А. П. Зегжды величину свободного члена следует принять равной 1,0.

6. Группа расчетных зависимостей, построенная на использовании функциональной связи вида $\Theta_d = f(\Theta)$, установленной Гриффитсом, Энгелундом и Каримом, позволяет повысить качество моделирования транспорта наносов. Точность вычислений по этим формулам примерно одинакова, однако остается ниже, чем по формулам Эйнштейна – Ялина. На основе результатов тестирования, выполненного при оценке относительной доли зернистой шероховатости по этим формулам, в дальнейшем необходимо исследовать возможность их использования в расчетной практике с учетом необходимости корректировки авторских значений коэффициентов в уравнениях регрессионного анализа. Это позволяет выполнить дальнейшее усовершенствование модели транспорта наносов с целью повышения качества и надежности русловых прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer-Peter E. Formulas for bed-load transport / E. Meyer-Peter, R. Muller // Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. — Delft, 1948. — Pp. 39–64.
2. Shields A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung: Diss. / A. Shields. — Berlin, 1936. — 26 p.
3. Egiazaroff I. V. Calculation of nonuniform sediment concentrations / I. V. Egiazaroff // Journal of the Hydraulics Division. — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 225–247.
4. Ribberink J. S. Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Report №.87-2 / J.S. Ribberink // Delft University of Technology, 1987. — 202 p.
5. Yalin M.S. Steepness of sedimentary dunes / M. S. Yalin, E. Karahan // Journal of the Hydraulics Division. — 1979. — Vol. 105. — Is. 4. — Pp. 381–392.
6. Söhngen B. Modelling of the Danube and Isar rivers morphological evolution. Part 1: Measurements and Formulation / B. Söhngen, Y. Kellerman, G. Loy // Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe. — 1992. — Vol. 3. — Pp. 1175–1207.
7. Gladkow G.L. Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen / G.L. Gladkow, B. Söhngen // Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. — Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. — Nr. 82. — Pp. 123–130.
8. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
9. Einstein H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows / H.A. Einstein // Technical Bulletin. — U.S. Dept. of Agriculture, 1950. — No. 1026.
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part 1: Bed load transport / L.C. Van Rijn // Journal of Hydraulic Engineering. — 1984. — Vol. 110. — Is. 10. — Pp. 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431)
11. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие / В.С. Кнороз // Изв. ВНИИГ. — 1958. — Т. 59. — С. 62–81.
12. Stricler A. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen / A. Stricler // Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft. — 1923. — № 16.
13. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах / А.П. Зегжда. — Л., М.: Госстройиздат, 1957. — 276 с.
14. Griffiths G. A. Flow resistance in coarse gravel bed rivers / G. A. Griffiths // Journal of the Hydraulics Division. — 1981. — Vol. 107. — Is. 7. — Pp. 899–918.
15. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К.В. Гришанин. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
16. Griffiths G. A. Form resistance in gravel channels with mobile beds / G. A. Griffiths // Journal of Hydraulic Engineering. — 1989. — Vol. 115. — Is. 3. — Pp. 340–355.

17. Engelund F. Hydraulic resistance of alluvial streams / F. Engelund // *Journal of the Hydraulics Division*. — 1966. — Vol. 92. — Is. 2. — Pp. 315–326.
18. Karim F. Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows / F. Karim // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 1995. — Vol. 121. — Is. 1. — Pp. 15–25. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(15)
19. Yang S. Q. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel / S. Q. Yang, S. K. Tan, S. Y. Lim // *Water resources research*. — 2005. — Vol. 41. — Is. 9. DOI: 10.1029/2005WR004211.
20. Самохвалова О. А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках / О. А. Самохвалова // *Современные проблемы науки и образования*. — 2015. — № 1-2. — С. 269.
21. Ferguson R. I. Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel / R. I. Ferguson, B. P. Sharma, R. J. Hardy, R. A. Hodge, J. Warburton // *Water Resources Research*. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
22. Stewart M. T. Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds / M.T. Stewart, S. M. Cameron, V. I. Nikora, A. Zampiron, I. Marusic // *Journal of Hydraulic Research*. — 2019. — Vol. 57. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
23. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: Монография / Г.Л. Гладков, Р.С. Чалов, К.М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Издательство Лань, 2019. — 432 с.

REFERENCES

1. Meyer-Peter, Eugen, and R. Müller. “Formulas for bed-load transport.” *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. Delft, 1948. 39–64.
2. Shields, Albert. *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung*. Diss. Berlin, 1936.
3. Egiazaroff, I. V. “Calculation of nonuniform sediment concentrations.” *Journal of the Hydraulics Division* 91.4 (1965): 225–247.
4. Ribberink, Jan S. *Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment*. Report №87-2. Delft University of Technology, 1987.
5. Yalin, Mehmet Selim, and Emin Karahan. “Steepness of sedimentary dunes.” *Journal of the Hydraulics Division* 105.4 (1979): 381–392.
6. Söhngen, B., J. Kellermann, G. Loy, and P. Belleudy. “Modelling of the Danube and Isar Rivers morphological evolution. Part I: Measurements and formulation.” *Proc. 5th Int. Symp. On River Sedimentation, Karlsruhe*. Vol. 3. 1992. 1175–1207.
7. Gladkov, G.L., and B. Söhngen. “Modellirung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen.” *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. 123–130.
8. Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. “Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.
9. Einstein, H. A. “The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.” *Technical Bulletin*. No. 1026. U. S. Dept. of Agriculture, 1950.
10. Van Rijn, Leo C. “Sediment transport, Part 1: Bed load transport.” *Journal of Hydraulic Engineering* 110.10 (1984): 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).
11. Knoroz, V. S. “Nerazmyvayushchaya skorost' dlya nesvyaznykh gruntov i faktory, ee opredelyayushchie.” *Izv. VNIIG* 59 (1958): 62–81.
12. Stricler, A. “Beitrage zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauchigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen.” *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft* 16 (1923).
13. Zegzhda, A.P. *Gidravlicheskie poteri na trenie v kanalakh i truboprovodakh*. L., M.: Gosstroizdat, 1957.
14. Griffiths, George A. “Flow resistance in coarse gravel bed rivers.” *Journal of the Hydraulics Division* 107.7 (1981): 899–918.
15. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
16. Griffiths, George A. “Form resistance in gravel channels with mobile beds.” *Journal of Hydraulic Engineering* 115.3 (1989): 340–355.
17. Engelund, Frank. “Hydraulic resistance of alluvial streams.” *Journal of the Hydraulics Division* 92.2 (1966): 315–326.

18. Karim, Fazle. "Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 121.1 (1995): 15–25. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(15).
19. Yang, Shu-Qing, Soon-Keat Tan, and Siow-Yong Lim. "Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel." *Water resources research* 41.9 (2005). DOI: 10.1029/2005WR004211.
20. Samokhvalova, O. A. "Selective approach for bedload discharge calculations in rivers." *Modern problems of science and education* 1-2 (2015): 269.
21. Ferguson, R. I., B. P. Sharma, R. J. Hardy, R. A. Hodge, and J. Warburton. "Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel." *Water Resources Research* 53.3 (2017): 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
22. Stewart, Mark T., Stuart M. Cameron, Vladimir I. Nikora, Andrea Zampiron, and Ivan Marusic. "Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds." *Journal of Hydraulic Research* 57.2 (2019): 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
23. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гладков Геннадий Леонидович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gladkov, Gennadii L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2020 г.
Received: March 18, 2020.*