

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055

HYDRAULIC RESISTANCE TO WATER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS

G. L. Gladkov, M. V. Zhuravlev

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

In natural river flows, the processes of converting mechanical energy into heat, transporting sediment and deformations of the riverbeds form a single whole. Given that sediment transport and hydraulic resistance in rivers are interrelated, further improvement of sediment transport models is impossible without an assessment of the hydraulic resistance of the riverbed and assessment of the stability of soil particles that are different in grain size and constitute the bottom of the river.

The continuing uncertainty of the division of the complete resistance into grained and ridged components and form resistance made us to look for a new approach to the formulation of formulas of hydraulic resistance of beds with fine-grained bottom soils, the founder of which is K.V. Grishanin. The authors of the work, adhering to a new approach to the formulas preparation, have explored the hydraulic resistance in the conditions of unsteady changing the river flow movement - the resistance of the channel at individual crossings and sections of river bends. The results of the given studies represent the system of dependences of the Shezi coefficient in the flow rate function and average depth of flow for various morphological elements of channels. With the establishment of new dependencies, the calculation practice has received a description of the mechanism of interaction between the river flow and the moving channel, and the use of these formulas in the hydraulic calculations allows us to assess the impact of engineering water transport activities on the hydraulics of the river flow and the conditions of sediment transport in the rivers.

The results of research on the modelling of heterogeneous sediment loads in rivers are presented in the paper. The studies carried out by a number of domestic and foreign authors have made it possible to establish generally accepted criteria for the stability of the soil particle at the bottom of the flow with respect to the conditions of movement of heterogeneous soil, as well as to obtain a method for calculating the relative proportion of the granular roughness of the bottom in the ridged form of sediment movement in rivers. On this basis, the structure of a modified model of transport of multi-grained sediment in rivers has been developed and verified on the basis of materials of full-scale measurements on rivers. A modified model of sediment transport allows for an extension of its possible application for a wider range of particle sizes of mixed-grained bed sediments in rivers.

Keywords: river, bank, rift, morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water consumption, sediment consumption, energy loss gradient, Shezi coefficient, tangential stress on bottom, channel reformation.

For citation:

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 admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

УДК 556.536

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ВОДЫ И ТРАНСПОРТ НАНОСОВ В РЕКАХ

Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев

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

Отмечается, что в естественных речных потоках процессы превращения механической энергии в теплоту, перемещения наносов и деформаций русел составляют единое целое. Учитывая, что транспорт наносов и гидравлическое сопротивление в реках взаимосвязаны, дальнейшее совершенствование моделей

транспорта наносов невозможно без оценки величины гидравлического сопротивления русла и устойчивости разнозернистых по крупности частиц грунта, слагающего дно реки. Сохраняющаяся на сегодняшний день неопределенность разделения полного сопротивления русла на зернистую и грядовую составляющие и сопротивление формы заставила искать новый подход к составлению формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна, основоположником которого является К. В. Гришанин. Придерживаясь нового подхода к составлению формул, в работе исследовано гидравлическое сопротивление в условиях неплавно изменяющегося движения речного потока — сопротивление русла на отдельных перекатах и на участках речных извилин. Результаты приведенных исследований представляют систему зависимостей коэффициента Шези в функции скорости течения и средней глубины потока для различных морфологических элементов русел. С установлением новых зависимостей расчетная практика получила описание механизма взаимодействия речного потока и подвижного русла, а использование в гидравлических расчетах данных формул позволяет оценить влияние инженерных воднотранспортных мероприятий на гидравлику речного потока и условия транспорта наносов в реках. В работе приводятся результаты исследований, посвященных вопросам моделирования разнозернистых наносов в реках. Исследования, выполненные отечественными и зарубежными авторами, позволили установить общепринятые критерии устойчивости частицы грунта на дне потока применительно к условиям движения неоднородного грунта, а также получить методику вычисления относительной доли зернистой шероховатости дна при грядовой форме движения наносов в реках. На этой основе в исследовании разработана структура модифицированной модели транспорта разнозернистых наносов в реках и выполнена верификация ее по материалам натурных измерений на реках. Модифицированная модель транспорта наносов позволяет расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнозернистого грунта донных отложений в реках.

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

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Проблема составления прогноза русловых переформирований в реках с подвижными донными отложениями является одной из наиболее сложных в области речной гидравлики. Наряду с традиционными методами исследований в современной практике гидравлических расчетов широко используются методы математического моделирования. Решаемые задачи, связанные с вопросами моделирования характеристик движения воды в естественных руслах рек с деформируемым дном, являются чрезвычайно сложными.

На практике задача заключается в выполнении гидравлических расчетов характеристик течения воды и параметров транспорта наносов (деформаций дна) в реках. В расчетном смысле она сводится к решению численными методами известной системы уравнений движения воды, неразрывности и деформаций при заданных начальных и граничных условиях. Данная система уравнений с пятью неизвестными замыкается с помощью двух дополнительных расчетных зависимостей: закона гидравлического сопротивления в виде формулы коэффициента Шези и формулы расхода наносов. Поэтому качество выполняемых русловых прогнозов в значительной степени зависит от надежности оценки потерь энергии по длине и параметров транспорта наносов в деформируемом русле.

В естественных русловых потоках сопротивление движению воды создается группой факторов: зернистой шероховатостью дна, донными волнами — грядами и рифелями, русловыми формами — побочными, осередками и изгибами русла, водной растительностью, а в зимнее время — нижней поверхностью льда и шугой. Многообразие этих факторов и их изменчивость по длине потока и во времени делает расчет гидравлического сопротивления естественных русел сложной задачей. Степень влияния каждого из указанных факторов в общую величину потерь энергии по длине [1] различна в разных реках. Так, в реках с относительно крупными грунтами основное

сопротивление движению воды оказывает отрывное обтекание частиц грунта речного аллювия на дне потока. На практике применяются расчетные формулы коэффициента Шези, построенные в функции от величины безразмерной крупности донных отложений H/d . Предпочтение обычно отдается известным расчетным зависимостям, имеющим структуру формул А. П. Зегжды и Маннинга – Штриклера, которые дают достаточно близкие результаты. В реках с песчаными донными отложениями превалирует доля потерь энергии, обусловленная отрывным обтеканием гряд на дне реки. Существование обратной связи в системе *поток ↔ подвижное русло* позволило получить ряд перспективных формул для коэффициента Шези в функции скорости течения и безразмерной глубины потока применительно к условиям движения воды в плесовых ложбинах [2], на перекатах [3] и в речных излучинах [4]. Новые расчетные зависимости получили апробацию по данным натурных наблюдений на реках и материалам экспериментальных гидравлических исследований [5], [6].

Исследования, выполненные рядом отечественных и зарубежных авторов, позволили установить общепринятые критерии устойчивости частицы грунта на дне потока [7], [8] применительно к условиям движения неоднородного грунта [9], [10], а также получить методику вычисления относительной доли зернистой шероховатости дна [11] при грядовой форме движения наносов в реках. На этой основе в исследованиях авторов [12], [13] была разработана структура новой модели транспорта наносов.

В процессе дальнейшего расчетного обоснования в области транспорта наносов возникают объективные трудности. До настоящего времени вопросы оценки величины сопротивления движению воды и расхода наносов в русле реки изучались раздельно. Вместе с тем величина потерь энергии по длине, оцениваемая формулой Шези, входит в уравнение движения воды и в уравнение деформаций в составе формулы расхода наносов. Поэтому при анализе характеристик транспорта наносов в реках оказывается затруднительным найти объективные и физически измеряемые параметры перемещения частицы речного аллювия под действием текущей воды.

Основной целью настоящей работы является создание модифицированной модели транспорта разнозернистых наносов в реках на основе результатов выполненных ранее исследований и верификация ее по материалам натурных измерений на реках.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна — размеры гряд и скорость их перемещения — определяются скоростью течения воды и глубиной потока. От крупности донных частиц размеры гряд зависят слабо. Учитывая слабую зависимость величины потерь энергии по длине от крупности частиц в реках с мелкозернистыми донными отложениями, в дальнейшем можно отказаться от необходимости учета параметров, связанных с диаметром донных отложений. В данном случае связь между коэффициентом Шези и скоростью течения можно представить следующим набором масштабов подобия:

$$C/\sqrt{g} = f(U/\sqrt[3]{gv}, U/\sqrt{gH}, B/H). \quad (1)$$

В качестве параметра однозначности, учитывающего различные поперечные размеры потоков, здесь используется параметр B/H (где B — ширина русла; H — средняя глубина). Учитывается также, что перемещение мелких частиц не свободно от влияния вязкости воды.

Зависимость между величиной коэффициента Шези и скоростью течения воды может быть получена на основе установленного К. В. Гришаниным универсального параметра M , представляющего собой локальный инвариант подобия квазиравномерных потоков:

$$M = \frac{H(gB)^{1/4}}{Q^{1/2}} = \text{const}. \quad (2)$$

Параметр M представляет собой величину, обратную произведению критерия геометрического подобия B/H на критерий динамического подобия, — число Фруда в квадрате U^2/gH , входящие в состав набора масштабов подобия. Другой аргумент, представленный в функции (1) в виде скорости течения воды $U/\sqrt[3]{gv}$ нормированной величиной коэффициента кинематической вязко-

сти, есть корень кубический из произведения числа Рейнольдса на квадрат числа Фруда. Решая уравнение (2) совместно с формулой Шези, получим

$$C/\sqrt{g} = (1/M)U^{1/2} / (gB)^{1/4} I^{1/2}, \quad (3)$$

откуда следует, что в руслах рек, сложенных несвязными мелкозернистыми грунтами, при квазиравномерном течении воды коэффициент Шези пропорционален скорости течения в степени 1/2. На других морфологических элементах речного русла: перекатах, излучинах и русловых разветвлениях, где движение воды является неравномерным, можно ожидать иную степень зависимости величины коэффициента Шези от скорости течения.

Аргументами расхода русловых наносов в естественных потоках с мелкозернистыми песчаными донными отложениями служат: кинетичность потока, подвижность донных частиц и гидравлическое сопротивление речного русла. Коэффициент подвижности частиц донных отложений записывается в виде

$$\Theta \equiv \tau_* = \rho(U_*')^2 / (\rho_s - \rho)gd. \quad (4)$$

Расход наносов обычно представляется пропорциональным разнице значений влекущей силы потока $q_s \sim (\Theta - \Theta_c)^m$, где Θ_c — критическое значение коэффициента подвижности, отвечающее началу сдвига частиц на дне потока. При другом подходе аргументом расхода наносов является разность значений средней и неразмывающей скоростей течения воды. В подавляющем большинстве расчетных формул расхода наносов, полученных в лабораторных и в натуральных условиях, установлена зависимость расхода наносов от определяющего аргумента — скорости течения воды в степени 3–4.

Большинство расчетных формул расхода наносов были получены экспериментально с однородным грунтом при безгрядовом дне. При применении этих формул в расчетах естественных речных потоков приходится корректировать величину критического значения коэффициента подвижности, выделяя так называемый «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 удается учесть различную вероятность сдвига частиц грунта различной крупности в смеси на дне потока.

При вычислении коэффициента подвижности частиц при грядовом дне, необходимо корректировать величину коэффициента Шези, выделяя так называемый «ripple-factor» для оценки относительной доли грядовой шероховатости. Вследствие того, что разные авторы прибегают к различным приемам, в настоящей работе выполнена верификация ряда расчетных методик для оценки качества вычислений на основе массива натуральных исходных данных.

По материалам Государственного водного кадастра, в течение различных периодов наблюдений была подготовлена база данных, содержащая результаты измерений гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла на гидрологических постах, которая включает материалы измерений на двадцати девяти различных реках с общим объемом выборки около 900 измерений для верификации формулы коэффициента Шези. Объем выборки измеренных расходов наносов составил 296 измерений.

Результаты (Results)

Гидравлическое сопротивление движению воды в естественных руслах рек. В потоках с деформируемым руслом разделение потерь энергии по длине на зернистую и грядовую составляющие сопротивления движению воды затруднено в связи с отсутствием объективных критериев для оценки вклада действующих факторов в общую величину потерь. Это побуждает искать другие подходы к составлению формулы гидравлического сопротивления русел рек с мелкозернистыми грунтами дна. Учитывая, что основная доля потерь энергии по длине в реках с подвижным дном обусловлена наличием донных гряд, параметры которых, в свою очередь, определяются характеристиками течения воды, представляется целесообразным раскрыть зависимость

вида (3) путем установления прямой связи между коэффициентом Шези и скоростью течения воды. К. В. Гришанин в процессе исследования гидравлического сопротивления квазиравномерных потоков с песчаным дном и развитой грядовой шероховатостью (участки русел в прямолинейных плесовых лощинах) пришел к функциональной зависимости вида

$$C/\sqrt{g} = f(U/\sqrt[3]{gv}, B/H). \quad (5)$$

При выборе данных масштабов в качестве основных аргументов коэффициента Шези учитывалось, что сопротивление ровного дна, сложенного из частиц песчаной фракции, в принципе подвержено влиянию вязкости, в то время как вариации диаметра частиц в границах этой фракции не оказывают заметного влияния ни на сопротивление ровного дна, ни на грядовое сопротивление.

Полученная расчетная формула полного коэффициента Шези записывается в виде

$$C/\sqrt{g} = 5,25(U/\sqrt[3]{gv})^{1/2} (H/B)^{1/6}. \quad (6)$$

Формула (6) подтверждена с высоким для натуральных данных коэффициентом корреляции. Второй аргумент в данной формуле представляет собой безразмерную глубину потока или величину, обратную относительной ширине русла. Из полученной зависимости следует, во-первых, что при равных скоростях течения гидравлическое сопротивление движению воды в относительно более крупных и глубоких реках будет меньше, чем в мелких и широких, а во-вторых, что с ростом уровней воды в реке коэффициент Шези будет возрастать.

Изучая сопротивление русла на перекатах, Г. Л. Гладков предположил, что оно связано с кинетичностью потока. Основная гипотеза автора построена исходя из того, что при низких меженных уровнях размыв перекатов идет тем интенсивнее, чем больше уклон свободной поверхности I . Причем в ходе размыва средняя длина гряд l_r возрастает. Это позволяет считать, что между относительной длиной гряд l_r/H и уклоном I имеется соотношение пропорциональности $l_r/H \sim I$. Данное предположение позволило получить следующую зависимость:

$$C/\sqrt{g} \sim (U/\sqrt{gH})^{3/4}. \quad (7)$$

Для проверки высказанной гипотезы Г. Н. Гладков использовал материалы натуральных измерений на перекатах ряда судоходных рек, а также данные «Карт внутренних водных путей» участков ряда крупных судоходных рек России. В результате была получена формула для коэффициента Шези на перекатах с песчаными донными отложениями при низких уровнях воды:

$$C/\sqrt{g} = 71,4(U/\sqrt{gH})^{3/4}. \quad (8)$$

Позднее вся совокупность имеющихся натуральных данных была разделена на три группы. К первой группе были отнесены данные измерений на реках, когда скорости течения меньше неразмывающей скорости и транспорт наносов на участке отсутствует. Вторая группа включала в себя переходный диапазон изменения скоростей течения от неразмывающей до размывающей скорости. К третьей группе относились материалы натуральных наблюдений со скоростями течения, большими размывающих скоростей. В этой группе заведомо наблюдался транспорт наносов и существовала грядовая шероховатость. В общем объеме выборки натуральных данных к этой группе относятся 315 измерений. Учет влияния глубины потока в области подвижного русла позволил получить новую зависимость коэффициента Шези:

$$C/\sqrt{g} = 18,6(U/\sqrt{gH})^{3/4} (\sqrt[3]{gH^3/v^2})^{1/8}. \quad (9)$$

Полученная формула по точности не уступает расчетной формуле (6). Область их возможного применения на практике следует связать с размерностью, применяемой в расчетах гидродинамической модели. Формулу (6) можно рекомендовать при решении задач в одномерной постановке, а расчетную формулу вида (9), соответственно, в двухмерной. Возможная область их применения ограничивается совокупностью рек с песчаными грунтами дна при скоростях течения, обеспечивающих транспорт наносов в виде донных гряд.

М. В. Журавлев исследовал сопротивление песчаного русла на его изгибах. Основу расчетов составили материалы натуральных наблюдений на отдельных извилинах рек Вятки, Десны, Дона,

Иртыша, Луги и Оки. На всех участках дно было сложено мелким и средним песком и наблюдался грядовой транспорт наносов. Отношение r_0/B радиуса кривизны осевой линии русла к его средней ширине в пределах извилины составило у рассматриваемых изгибов 1,46–10,2. Данные по всем извилинам хорошо (с коэффициентом корреляции 0,92) удовлетворяют уравнению

$$C/\sqrt{g} = 42,25(U/\sqrt{gH})^{0,53}. \quad (10)$$

М. В. Журавлев, обработав материалы лабораторных исследований И. Ониши и Р. Хука, установил, что опыты в лотках дают такую же степенную функцию примерно с тем же показателем степени, что и в зависимости (10), но с меньшим значением коэффициента пропорциональности. Как натурным, так и экспериментальным данным удовлетворяет формула

$$C/\sqrt{g} = 1,12(U/\sqrt{3gv})^{1/2}(r_0/H)^{1/6}. \quad (11)$$

Анализ полученных результатов показывает, что при различных морфологических элементах речного русла изменяется характер связи коэффициента Шези с определяющими факторами. В плесовых лощинах при квазиравномерном движении воды в реках основным аргументом сопротивления движению воды является скорость течения воды, представленная в формуле (6) в безразмерном виде. Функциональная связь с параметром B/H в полученной формуле оказалась слабее, чем со скоростью течения. Иная картина наблюдается на перекатах и в мелких плесовых лощинах при низких уровнях воды. Кинетичность потока в данных условиях возрастает, что приводит к усилению связи коэффициента Шези с глубиной потока. В речных излучинах встречаются оба вида русловых образований: перекаты и плесовые лощины, и могут реализовываться оба вида зависимостей коэффициента Шези.

С установлением новых зависимостей расчетная практика получила описание механизма взаимодействия речного потока и подвижного русла. Полученные формулы коэффициента Шези в неявном виде учитывают изменение параметров донных гряд и обусловленных ими потерь энергии по длине с изменением граничных условий движения воды. Использование в гидравлических расчетах данных формул позволяет оценить влияние инженерных воднотранспортных мероприятий на гидравлику речного потока и условия транспорта наносов в реках.

В практике гидравлических расчетов такого рода зависимости пока большого распространения не получили. В современных научных и экспериментальных исследованиях [14]–[16], а также в инженерной практике по-прежнему широко применяются традиционные методы вычислений, основанные на использовании расчетных формул типа Маннинга – Штриклера.

Моделирование транспорта разнотернистых наносов в реках. При моделировании транспорта разнотернистых наносов в реках в настоящее время авторы используют известную зависимость $\tau_{*c} = f(Re_{*c})$ для оценки критического касательного напряжения на дне, полученную Шильдсом для однородного грунта, которую корректируют при выполнении пофракционных расчетов. При этом значения параметра Шильдса и числа Рейнольдса зависят от величины динамической скорости:

$$\Theta_c \equiv \tau_{*c} = \frac{\rho(v_{*c})^2}{(\rho_s - \rho)gd}, \quad Re_{*c} = \frac{v_{*c}d}{\nu}. \quad (12)$$

В своей работе Л. ван Рейн [17] описал графическую зависимость Шильдса набором из пяти регрессионных расчетных зависимостей критического значения коэффициента подвижности от величины безразмерного диаметра частиц $D_* = (\rho'g/v^2)^{1/3}d$:

$$\begin{aligned} \Theta_c &= 0,24(D_*)^{-1}, & D_* \leq 4; \\ \Theta_c &= 0,14(D_*)^{-0,64}, & 4 < D_* \leq 10; \\ \Theta_c &= 0,04(D_*)^{-0,10}, & 10 < D_* \leq 20; \\ \Theta_c &= 0,013(D_*)^{0,29}, & 20 < D_* \leq 150; \\ \Theta_c &= 0,055, & D_* > 150. \end{aligned} \quad (13)$$

В отечественной расчетной практике для оценки критического значения коэффициента подвижности широко используются результаты, полученные В. С. Кнорозом. В работе [18] установленная им связь критического значения коэффициента подвижности была аппроксимирована следующим выражением:

$$\Theta_c = 0,026 \left(\frac{D_* + 1,3}{D_* - 0,72} \right)^2. \quad (14)$$

Сопоставление материалов экспериментальных исследований Шильдса и Кнороза показывает, что в области относительно малых значений числа Рейнольдса Re_{*c} , отвечающих гидравлически гладкому и переходному режимам сопротивления, они дают достаточно близкие результаты при оценке критической величины коэффициента подвижности Θ_c . Начиная со значений $Re_{*c} \geq 10-15$ величина коэффициента подвижности по Шильдсу становится больше, чем по Кнорозу. В автомодельной области критическое значение коэффициента подвижности, по данным Шильдса, составляет $\Theta_c = 0,055$, а по данным Кнороза — $\Theta_c = 0,026$. Эта разница представляется существенной.

Условия сдвига неоднородных частиц грунта на дне оцениваются для каждой фракции в зависимости от среднего диаметра путем введения корректирующего коэффициента, учитывающего эффект «затенения» отдельной частицы грунта в смеси — так называемый «*hiding/exposure-factor*».

Б. Зенген выполнил анализ результатов исследований И. В. Егiazарова по проблеме оценки устойчивости частицы неоднородного грунта на дне речного потока. С учетом экспериментальных данных ряда других авторов предложена система расчетных зависимостей (Ашида – Егiazаров – Зенген) для величины критического значения коэффициента подвижности для фракции грунта в смеси:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = 0,85 \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-1}, \quad 0 \leq \frac{d_i}{d_m} < 0,4; \\ \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = \left(\frac{\lg 19}{\lg 19 d_i/d_m} \right)^2, \quad 0,4 \leq \frac{d_i}{d_m} < 1,0; \\ \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0,9}, \quad 1,0 \leq \frac{d_i}{d_m} < \infty. \end{aligned} \quad (15)$$

Дж. Рибберинк модифицировал широко известную формулу Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера [19] применительно к пофракционному расчету расхода наносов. Полученные результаты позволили автору на основании анализа ряда апробированных методик выделить в расчетах относительную долю зернистой шероховатости, так называемый *ripple-фактор* в виде произведения $\mu\Theta_i$, где $\Theta_i = HI/d_i(\rho_s/\rho - 1)$ — коэффициент подвижности отдельной фракции грунта. Параметр μ в данном случае вычисляется в соответствии с известными рекомендациями по формуле $\mu = (K'_s/K_s)^{1/4} = (K'_s/(K'_s + K''_s))^{1/4}$. При этом эффективная высота выступов шероховатости на дне грядового потока рассчитывается в зависимости от среднего диаметра частиц: $K'_s = d_m + 1,6S_{dm}$, где $S_{dm} = \sqrt{\sum_i (d_i - d_m)^2}$.

Величина, характеризующая грядовое сопротивление речного дна, находится в зависимости от параметров донных гряд: $K''_s = 10h_D^2/L_D$, а сами параметры донных волн — высота (h_D) и длина (L_D) — вычисляются в соответствии с рекомендациями М. Ялина по формулам: $h_D = 1H/6(1 - \Theta_{cm}/\Theta_m) \times (1 - Fr^2)$ и $L_D = 5H$.

На основании приведенных ранее результатов исследований в работах авторов [18], [19] была получена структура модели транспорта разнозернистых наносов в реках, для верификации

которой был выполнен анализ и тестирование различных формул расхода наносов по материалам натуральных измерений в реках.

Тестовые расчеты выполнялись для среднего диаметра частиц и пофракционно по формулам Л. ван Рейна [17], Э. Мейер-Петера и Мюллера [19], а также других авторов — всего 30 различных моделей расчета. Для пофракционного расчета расхода наносов использовались известные модификации формул, полученные Рибберинком [10] и Б. Зенгеном [11]. Общая характеристика выборки материалов измерений, использованных для тарировки модели транспорта наносов, представлена в таблице.

**Общая характеристика выборки данных измерений
 для тарировки модели транспорта наносов**

Средняя скорость течения, м/с (от / до)	Средняя глубина, м (от/до)	Средний (геометрический) диаметр донных отложений мм (от/до)	Уклон свободной поверхности ‰ (от/до)	Температура воды, град, °С	Количество измерений
0,09/2,77	0,06/7,3	0,25/93,2	0,003/11,0	1,1/24,7	296

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

Обсуждение (Discussion)

В ходе вычислений по каждой расчетной формуле между измеренными и рассчитанными расходами наносов строилась регрессионная зависимость вида $\ln(Q_s)_{изм} = a + b(\ln(Q_s)_{расч})$, по которой оценивалась корреляция данной связи. Другим критерием, определяющим качество вычислений по каждой модели, было установлено требование сохранить авторскую трактовку тестируемой формулы. При этом показатель степени при скорости течения (коэффициенте подвижности) в формуле расхода наносов останется неизменным при угловом коэффициенте $b = 1$ в уравнении регрессии.

Данные тестовых расчетов показали, что из всех рассмотренных вариантов наилучшие результаты вычислений получаются на основе исходной формулы Л. ван Рейна [11], разработанной автором для вычисления расхода мелкозернистых наносов в реках. Модификация данной зависимости позволила расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнородного грунта донных отложений в реках. Полученная формула записывается в виде

$$q_s = AHU Fr^{2,4} \sum_{i=1}^n \beta_i \left(\frac{1 - \sqrt{\xi_i \Theta_{ci} / \mu \Theta_i}}{\sqrt{\rho_s / \rho - 1}} \right)^{2,4} \quad (16)$$

Сопоставление рассчитанных значений расходов влекомых наносов с натурными данными свидетельствуют об их удовлетворительном совпадении. Коэффициент корреляции в уравнении регрессии составил 0,887. Значение свободного члена в модифицированной формуле Л. ван Рейна $A = 0,0014$. Величина углового коэффициента b в уравнении регрессии по результатам тестирования модели оказалась равной 0,997, что позволило сохранить неизменным в формуле (16) установленное автором значение показателя степени.

Качество вычисления расхода наносов по формуле Мейер-Петера и Мюллера в авторском виде и в различных вариантах ее модификации оказалось ниже, чем по формуле Л. ван Рейна. Во всех вариантах тестовых расчетов угловой коэффициент в уравнении регрессии оказался отличным от единицы и составил в среднем $b = 0,77$. В этой связи следует ограничить область возможного использования исходной зависимости МПМ-диапазоном значений диаметров крупных частиц, установленным автором при ее получении. И, наконец, вполне удовлетворительной по точности вычислений оказалась вероятностная формула Г. Эйнштейна [20]. По всем остальным расчетным зависимостям тестовые вычисления показали относительно более низкие результаты в сопоставлении с натурными данными.

Заключение (Conclusion)

Исследования, выполненные в настоящей работе, позволили получить новую модель транспорта наносов, пригодную для вычисления расхода разнозернистых влекомых наносов в широком диапазоне изменения крупности частиц грунта донных отложений. Наилучшие результаты в сопоставлении с материалами натуральных измерений на реках дала модифицированная формула Л. ван Рейна (1984). Эта формула была получена и протестирована по данным двухсот двадцати шести измерений на крупных реках. Диапазон значений диаметров частиц изменялся от 0,1 до 2,0 мм, глубины — от 1 до 20 м, а скорость течения — от 0,5 до 2,5 м/с. Изменение температуры при сопоставлении исходной зависимости не учитывалось — она была принята равной 15 °С. В рамках настоящей работы выполнено дополнительное тестирование формулы по данным 296 измерений на реках.

Усовершенствование формулы Л. ван Рейна было достигнуто в результате решения следующих вопросов. Разработанная модель транспорта наносов использует новое выражение (14) для оценки условий устойчивости частиц грунта на дне, полученное на основе экспериментальных данных В. С. Кнороза для широкого диапазона изменения крупности донных отложений. Применение формулы Кнороза привело к улучшению качества моделирования и позволило расширить область применения модифицированной зависимости.

В новой модели учтен эффект изменения критериальных условий сдвига частиц разнозернистого грунта в смеси. Рекомендованная методика вычислений получена на основе независимых апробированных материалов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных различными авторами. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что переход к пофракционному расчету расхода наносов дает улучшение качества моделирования. Другой аспект модификации заключается в использовании методики оценки относительной доли зернистой шероховатости при вычислении величины коэффициента подвижности в реках с грядовым дном. Тестовые расчеты в сопоставлении с натурными данными показали, что учет этого эффекта приводит к повышению качества работы модели.

Приведенные в работе результаты исследований в области оценки потерь энергии по длине можно рекомендовать использовать в следующих направлениях. Новые формулы коэффициента Шези можно применять в гидравлических расчетах, выполняемых при вычислении отметок свободной поверхности в реках в результате решения уравнения движения воды. При вычислении расхода наносов с целью расчета деформаций русла эти зависимости можно применять в формулах расхода наносов, имеющих структуру $q_s \sim (U - U_c)^m$. В формулах расхода наносов, построенных на основе использования метода влекущей силы в виде разности касательных напряжений на дне потока, необходимо дополнительно выделять величину «ripple»-фактора, что представляет определенные затруднения в расчетах и приводит к увеличению общей погрешности вычислений.

В дальнейшем планируется выполнить тестирование по натурным данным различных формул коэффициента Шези, полученных для оценки зернистой шероховатости дна. Следует полагать, что при использовании в реальных условиях традиционных формул типа Маннинга – Штриклера, Зегжды, а также ряда других авторов потребуются их корректировка по сравнению результатами, полученными ранее авторами в лабораторных условиях. Такой подход позволит упростить рекомендованную здесь модель транспорта наносов и повысит точность вычисления расхода наносов.

Качество результатов, полученных при создании и верификации численных моделей расхода русловых наносов в реках, в значительной степени зависит от надежности используемых натуральных данных. Традиционные способы измерения расхода наносов донными батометрами, которые применялись ранее при проведении наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах Росгидромета, имеют достаточно большую погрешность. Необходимо развивать используемую базу данных, ориентируясь на другие способы измерений. Такая работа была проведена в последние годы Государственным гидрологическим институтом [21]–[23]. Данное направление исследований, основанное на использовании методики расчета расхода русловых наносов

с использованием параметров донных гряд, может объективно привести к повышению качества прогнозов [24] русловых переформирований на реках. С этой целью необходимо получить надежные расчетные зависимости для определения размеров донных гряд и скорости их перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гришанин К. В.* Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
2. *Гришанин К. В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
3. *Gladkov G. L.* Hydraulic resistance in natural channels with movable bed / G. L. Gladkov // Proc. of the Int. Symp. East- West, North- South Enc. on the State-of-the-art in Riv. Eng. Methods and Design Philosophies. — St. Petersburg, 1994. — Vol. 1. — Pp. 81–91.
4. *Журавлев М. В.* Гидравлическое сопротивление на повороте речного русла / М.В. Журавлев // Повышение пропускной способности портовых и судоходных сооружений: сб. тр. — Л.: ЛИВТ, 1987. — С. 184–190.
5. *Onishi Y.* Effects of meandering in alluvial streams / Y. Onishi, S. C. Jain, J. F. Kennedy // Journal of the Hydraulics Division. — 1976. — Vol. 102. — Is. 7. — Pp. 899–918.
6. *Hooke R. L. B.* Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend / R. L. B. Hooke // The Journal of geology. — 1975. — Vol. 83. — No. 5. — Pp. 543–565. DOI: 10.1086/628140
7. *Shields A.* Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung. Diss. / A. Shields. — Berlin, 1936. — 26 p.
8. *Кнороз В. С.* Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие / В.С. Кнороз // Изв. ВНИИГ. — 1958. — Т. 59. — С. 62–81.
9. *Egiazaroff I. V.* Calculation of nonuniform sediment concentrations / I.V. Egiazaroff // Journal of the Hydraulics Division. — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 225–247.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *Gladkov G. L.* Hydraulic resistance in water and river sediments transport / G. L. Gladkov // Proc. of the Int. Scientific Council on Erosion, River Channel and Mouth Processes. — Bydgoszcz, Poland: Inst. Of Geography at Kazimierz Wielki Univ, 2012. — Pp. 30–36.
14. *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.
15. *Ferguson R. I.* Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel / R. I. Ferguson [et al] // Water Resources Research. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
16. *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.
17. *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).
18. *Гладков Г. Л.* Моделирование транспорта неоднородных крупнозернистых наносов в русле реки : сб. науч. тр. / Г. Л. Гладков. — СПб.: СПГУВК, 1996. — С. 288–304.
19. *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.
20. *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.
21. *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.

22. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 9 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

23. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Там же. — 2017. — № 8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

24. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2019. — 432 с.

REFERENCES

1. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
2. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
3. Gladkov, G. L. “Hydraulic resistance in natural channels with movable bed.” *Proc. of the Int. Symp. East-West, North-South Enc. on the State-of-the-art in River Eng. Methods and Design Philosophies*. Vol. 1. St. Petersburg, 1994. 81–91.
4. Zhuravlev, M. V. “Gidravlichesкое soprotivlenie na povorote rechnogo rusla.” *Povyshenie propusknoi sposobnosti portovykh i sudokhodnykh sooruzhenii: Sb. Trudov*. L.: LIVT, 1987. 184–190.
5. Onishi, Yasuo, S. C. Jain, and J. F. Kennedy. “Effects of meandering in alluvial streams.” *Journal of the Hydraulics Division* 102.7 (1976): 899–918.
6. Hooke, Roger Le B. “Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend.” *The Journal of geology* 83.5 (1975): 543–565. DOI: 10.1086/628140
7. Shields, Albert. *Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung*. Diss. Berlin, 1936.
8. Knoroz, V. S. “Nerazmyvayushchaya skorost' dlya nesvyaznykh gruntov i faktory, ee opredelyayushchie.” *Izv. VNIIG* 59 (1958): 62–81.
9. Egiazaroff, I. V. “Calculation of nonuniform sediment concentrations.” *Journal of the Hydraulics Division* 91.4 (1965): 225–247.
10. Ribberink, Jan S. *Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment*. Report №.87-2. Delft University of Technology, 1987.
11. Söhngen, B., J. Kellermann, and G. Loy. “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.
12. Gladkow, G. L., and B. Söhngen. “Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen.” *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. 123–130.
13. Gladkov, G. L. “Hydraulic resistance in water and river sediments transport.” *Proc. of the Int. Scientific Council on Erosion, River Channel and Mouth Processes*. Bydgoszcz, Poland: Inst. Of Geography at Kazimierz Wielki Univ, 2012. 30–36.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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).

18. Gladkov, G.L. “Modelirovanie transporta neodnorodnykh krupnozernistykh nanosov v rusle reki.” *Sb. nauchn. tr. SPGUVK*. SPb.: SPGUVK, 1996. 288–304.
19. Meyer-Peter, E., and R. Muller. “Formulas for bed-load transport.” *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. Delft, 1948. 39–64.
20. Einstein, H. A. “The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.” *Technical Bulletin*. No. 1026. U. S. Dept. of Agriculture, 1950.
21. Samokhvalova, O. A. “Selective approach for bedload discharge calculations in rivers.” *Modern problems of science and education* 1-2 (2015): 269.
22. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. “Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v bol'shikh, malykh i srednikh ravninnykh rekakh.” *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 9 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM>.
23. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. “Dannye izmerenii gidravlicheskih kharakteristik transporta donnykh nanosov v gidravlicheskih modelyakh gornyykh rek i lotkovykh eksperim-mentakh.” *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 8 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM>.
24. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Журавлев Михаил Валентинович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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
Zhuravlev, Michail V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.
Received: November 25, 2019.