

SUMMARY OF THE RESULTS OF FIELD AND LABORATORY STUDIES OF HYDRAULIC RESISTANCE DURING CHANNEL BENDING

M. V. Zhuravlev, G. L. Gladkov, P. V. Belyakov

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

The reliability of channel forecasts, performed using mathematical modeling methods in the design of engineering activities on shipping rivers, largely depends on the accuracy of the assessment of hydraulic resistance and sediment transport parameters. Therefore, the hydraulic resistance of natural channels is one of the largest problems in the dynamics of channel flows and is the object of close attention of scientists. In the resistance of natural channels, roughness appears in three forms: the first of them is the roughness of the granular surface of the bottom; the second is the roughness created by boulders and the third type is the roughness of microforms: ripples and ridges. Channel mesoforms also contribute to the resistance to water movement: spits, side streams, middle streams, islands, bends of the channel and such complex formations as riffles. This type of resistance is usually called the resistance of the channel form. The resistance of the natural channel shape due to the movement and deformation of mesoforms can change significantly over time. The complexity and insufficient study of this issue significantly limit the possibilities of a theoretical approach to its solution. Therefore, the obtained results are mainly empirical or semi-empirical in nature. The paper presents the results of experimental and field studies that allowed us to identify the main features of flow movement in winding sections of rivers. One of the features of flow movement at channel turns is the possibility of additional energy losses. The total resistance of a curved section of a channel is made up of three main parts: the resistance of the granular surface of the bottom, the resistance of the bottom ridges, and the resistance of the channel shape. The additional resistance created by the bend depends on the curvature of the channel, the rate of change in depth along the length of the bend, and also reflects the impact of side streams formed near the convex bank on the flow.

Keywords: channel, river flow, channel bend, hydraulic resistance, energy loss, bottom roughness, flow velocity, roughness coefficient.

For citation:

Zhuravlev, Michael V., Gladkov, Gennadii L. and Belyakov, Pachom V. "Summary of the results of field and laboratory studies of hydraulic resistance during channel bending." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 726–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

УДК 556.536

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ИЗГИБЕ РУСЛА

М. В. Журавлев, Г. Л. Гладков, П. В. Беляков

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

Темой исследования является анализ надежности русловых прогнозов, выполняемых с использованием методов математического моделирования при проектировании инженерных мероприятий на судоходных реках, который в значительной степени зависит от точности оценки гидравлического сопротивления и параметров транспорта наносов. В работе отмечается, что гидравлическое сопротивление естественных русел является одной из основных проблем динамики русловых потоков и объектом пристального внимания ученых. Акцентируется внимание на том, что сопротивление естественных русел шероховатости выступает в трех видах: первый — это шероховатость зернистой поверхности дна; второй — шероховатость, создаваемая валунами; третий — шероховатость микроформ: рифелей и гряд. Также подчеркивается, что влияние на сопротивление движению воды оказывают русловые мезоформы: косы, побочни,

осередки, острова, изгибы русла и такие сложные образования, как перекааты. Этот вид сопротивления, обычно называемый сопротивлением формы русла, в связи с перемещением и деформациями мезоформ может заметно изменяться во времени. Обращается внимание на то, что сложность и недостаточная изученность этого вопроса существенным образом ограничивают возможности теоретического подхода к его решению. Поэтому полученные результаты носят в основном эмпирический или полуэмпирический характер. В работе приведены результаты экспериментальных и натурных исследований, позволяющих выявить основные особенности движения потока на извилистых участках рек. Рассмотрена одна из особенностей движения потока на поворотах русла, такая как возможность появления дополнительных потерь энергии. Проанализировано суммарное сопротивление изогнутого участка русла, состоящее из трех основных частей: сопротивления зернистой поверхности дна, сопротивления донных гряд и сопротивления формы русла. Сделан вывод о том, что добавочное сопротивление, создаваемое изгибом, зависит от кривизны русла, быстроты изменения глубин по длине извилины, а также отражает воздействие на поток побочных, формирующихся у выпуклого берега.

Ключевые слова: русло, речной поток, изгиб русла, гидравлическое сопротивление, потеря энергии, шероховатость дна, скорость течения, коэффициент шероховатости.

Для цитирования:

Журавлев М. В. Обобщение результатов натурных и лабораторных исследований гидравлических сопротивлений на изгибе русла / М. В. Журавлев, Г. Л. Гладков, П. В. Беляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 726–737. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-726-737.

Введение (Introduction)

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 [1]. Современный уровень развития динамики русловых потоков [2] требует рассматривать речной поток и подвижное русло как единую систему, взаимодействие в которой осуществляется по принципу обратной связи (поток ↔ русло). При этом поток сам создает и регулирует шероховатость своего дна. В естественных руслах сопротивление движению воды создается группой факторов: зернистой шероховатостью дна, донными волнами (грядами и рифелями), русловыми формами (побочными, осередками, изгибами русла), водной растительностью, в зимнее время — нижней поверхностью льда и шугой [3], [4]. Ввиду разнородности этих факторов и их изменчивости по длине потока и во времени расчет гидравлического сопротивления естественных русел является сложной задачей. Сложность выбора коэффициента шероховатости и неопределенность этого понятия для естественных русел обусловили необходимость разработки новых способов расчета гидравлического сопротивления.

В сопротивлении естественных русел шероховатость выступает в трех видах, первым из которых является шероховатость зернистой поверхности дна; вторым — шероховатость, создаваемая валунами; третьим — шероховатость микроформ: рифелей и гряд. Кроме того, влияние на сопротивление движению воды оказывают также русловые мезоформы: косы, побочники, осередки, острова, изгибы русла и такие сложные образования, как перекааты. Этот вид сопротивления обычно называют *сопротивлением формы русла*. Сопротивление формы естественных русел в связи с перемещением и деформациями мезоформ может заметно изменяться во времени.

В рамках настоящей работы выполнен анализ материалов лабораторных и натурных исследований, проведенных разными авторами, по определению сопротивления движению воды в естественных руслах, выявлены основные факторы, определяющие гидравлическое сопротивление изгибов речных русел.

Разделение гидравлических сопротивлений по длине в зависимости от действующих факторов, таких как зернистая шероховатость дна, грядовое сопротивление и сопротивление формы русла, применительно к потокам с деформируемым руслом является достаточно затруднительным, так

как влияние каждого из них изменяется по длине реки и зависит от времени, точнее, от фазы гидрологического цикла. Поэтому необходимость выделения относительной доли любого из видов сопротивлений движению воды всегда представляет определенную условность.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В гидравлике мерой сопротивления по длине служит величина τ_0 касательного напряжения на дне, осредненного по смоченному периметру русла. Сила сопротивления, приложенная со стороны русла к потоку, на единицу его длины равна $\tau_0 \chi$ (где χ — длина смоченного периметра). Сила трения заставляет поток терять энергию. При этом механическая энергия движущейся жидкости переходит в теплоту, рассеиваемую в окружающем пространстве. Механическая энергия, теряемая единицей массы жидкости на единице длины потока, равна силе трения.

Главной задачей теории гидравлического сопротивления является установление связи касательного напряжения на дне русла с параметрами потока: вязкостью и плотностью жидкости, скоростью течения, поперечным размером потока и т. д. Связь между касательным напряжением на дне и средней скоростью потока устанавливается формулами Шези и Дарси — Вейсбаха. По Шези $\tau_0 = \rho g U^2 / C^2$, а по Дарси — Вейсбаху $\tau_0 = \lambda \rho U^2 / 2$ (где ρ — плотность воды; U — средняя скорость в поперечном сечении; C — коэффициент Шези с размерностью $L^{1/2} T^{-1}$; λ — безразмерный коэффициент гидравлического трения). Соотношение между коэффициентами C и λ имеет вид $\lambda = 2g / C^2$.

В расчетах применяются обе формулы, различны лишь их сферы применения. Формула Дарси — Вейсбаха применяется преимущественно к потокам в трубах, формула Шези — к потокам в открытых руслах. В гидравлике открытых потоков для определения коэффициента Шези чаще всего применяют формулы, в которых сила трения на дне оценивается с помощью эмпирических коэффициентов шероховатости. В настоящее время наиболее часто используется формула Р. Маннинга:

$$C = \left(\frac{1}{n} \right) R^{1/6},$$

где R — гидравлический радиус;

n — коэффициент шероховатости с размерностью $L^{-1/3} T$.

Для естественных русел коэффициент шероховатости выражает суммарный эффект всех сопротивлений, встречающихся в руслах, и поэтому изменяется в широких пределах. В гидравлических справочниках [5] приведены подробные сведения о коэффициенте шероховатости в речных руслах, но в них нет никаких указаний на его изменение при колебаниях уровней. Между тем, как показывают исследования, эти изменения существенны, особенно в руслах с песчаными донными отложениями. Русла таких рек деформируемы и это значит, что русловой поток может изменять граничные условия собственного движения. Шероховатость дна и берегов не является здесь независимым фактором, она регулируется потоком. Колебания шероховатости во времени вместе с колебаниями глубин и скоростей течения образуют отклик потока на колебания водности реки. Взаимосвязь шероховатости дна с течением воды придает вопросам сопротивления естественных русел большую сложность. Поэтому применение в подвижном русле формулы Маннинга с табличными значениями коэффициентов шероховатости может приводить к грубым ошибкам.

Взаимосвязь между формой размываемого русла и кинематикой потока, вероятно, нигде не проявляется так явно, как на изгибе русла (рис. 1). В связи с этим движению воды в изогнутом русле посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований.

Данные экспериментальных и натурных исследований [1]–[17], позволили выявить основные особенности движения потока на извилистых участках рек, одной из которых на поворотах русла является вероятность появления дополнительных потерь энергии. Суммарное сопротивление изогнутого участка русла складывается из трех главных частей: сопротивления зернистой поверхности дна, сопротивления донных гряд и сопротивления формы русла. Создаваемое изгибом добавочное сопротивление зависит от кривизны русла, быстроты изменения глубин по длине извилины и отражает воздействие на поток побочной, формирующихся у выпуклого берега.

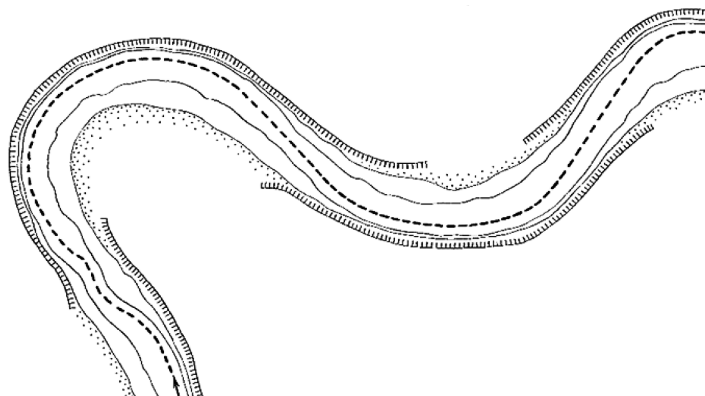


Рис. 1. Извилистый участок реки

Исследования сопротивления изгибов речных русел проводились как в лабораториях, так и в натурных условиях. Большинство лабораторных исследований было выполнено в лотках с жесткими вертикальными стенками. В одной части экспериментов дно было плоским и жестким, в другой — размываемым.

Результаты (Results)

В работе Х. Рауза [6] приведены сведения об опытах С. Хайата, в которых было исследовано сопротивление жесткого изогнутого канала прямоугольного сечения шириной $B = 0,43$ м, состоящего из шести последовательных поворотов на угол 90° (рис. 2). Измерения были выполнены при трех значениях относительной глубины потока H/B : $1/16$, $1/8$ и $1/4$. В качестве безразмерной оценки потерь энергии в изогнутом русле был использован коэффициент

$$k_L = H_L / (U^2 / 2g), \quad (1)$$

где H_L — общие потери удельной энергии жидкости.

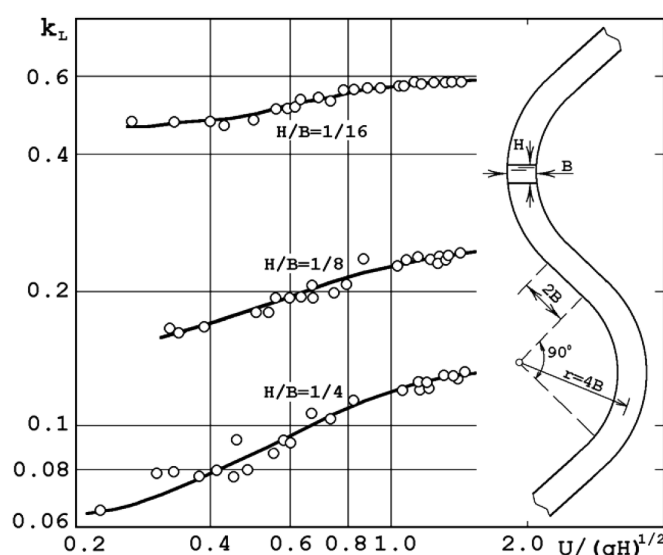


Рис. 2. График зависимости $k_L = f(U / \sqrt{gH})$ (по Хайату)

Сравнения с сопротивлением прямого канала в экспериментах Хайата выполнено не было. Опыты показали, что коэффициент k_L при каждом из значений H/B возрастает почти по линейному закону с ростом числа Фруда $U / \sqrt{gH}$ (см. рис. 2). При фиксированном числе Фруда коэффициент k_L убывал с ростом H/B .

Гидравлическое сопротивление изогнутого русла с размываемым дном исследовали И. Ониши, С. С. Джейн и Дж. Кеннеди [7]. Опыты проводились в лотке, составленном из двух последовательных круговых колен с углами поворота 90° (рис. 3). Ширина лотка составляла 2,34 м, радиус осевой линии — 8,54 м. На дно лотка был уложен песок с крупностью частиц $d_{50} = 0,25$ мм. Опыты в полном объеме были повторены при ширине лотка $B = 1,17$ м. Для уменьшения ширины лотка в 2 раза его разделяли вертикальной стенкой. Рельеф дна в опытах формировался самим потоком. Когда рельеф дна становился стабильным, измерялись основные характеристики потока. Глубины потока в лотках составляли 0,08–0,13 м, скорости течения — 0,21–0,56 м. Параллельно с опытами в криволинейном лотке проводились опыты в прямолинейном канале шириной 0,9 м.

Разность потерь удельной энергии жидкости на изогнутом и прямом участках русла длиной L при одних и тех же значениях гидравлического радиуса и средней скорости течения в работе [7] определялась по выражению

$$h_L = h_{fS} - h_S = (L/R)(\lambda_S - \lambda)(U^2/2g). \quad (2)$$

В формуле (2) нижний индекс S обозначает элементы потока в изогнутом лотке. В качестве безразмерной оценки разности потерь энергии был использован коэффициент

$$\zeta_L = (L/R)(\lambda_S - \lambda). \quad (3)$$

После анализа факторов, определяющих движение воды в изогнутом русле с размываемым дном, было принято, что величина ζ_L есть функция трех безразмерных параметров: числа Фруда, относительной зернистой гладкости дна и относительной кривизны русла:

$$\zeta_L = f(U/\sqrt{gR}, R/d_{50}, B/r). \quad (4)$$

График этой функции приведен на рис. 3. Опыты показали следующее. Характеризующий сопротивление изгиба коэффициент ζ_L при фиксированных значениях R/d_{50} и B/r растет с числом Фруда почти по линейному закону. При малых глубинах в лотках ($R/d_{50} = 310$) коэффициент ζ_L оказался отрицательным (сопротивление изогнутого лотка было меньше прямолинейного). Если при этом мала также ширина лотка ($B/r = 0,137$, $B/R = 15,1$), то значения ζ_L близки к $-0,5$. По мнению авторов исследования, этот результат можно объяснить тем, что в узком лотке побочень у выпуклого берега был слабо развит, в широком лотке коэффициент ζ_L увеличивался вместе с высотой побочня.

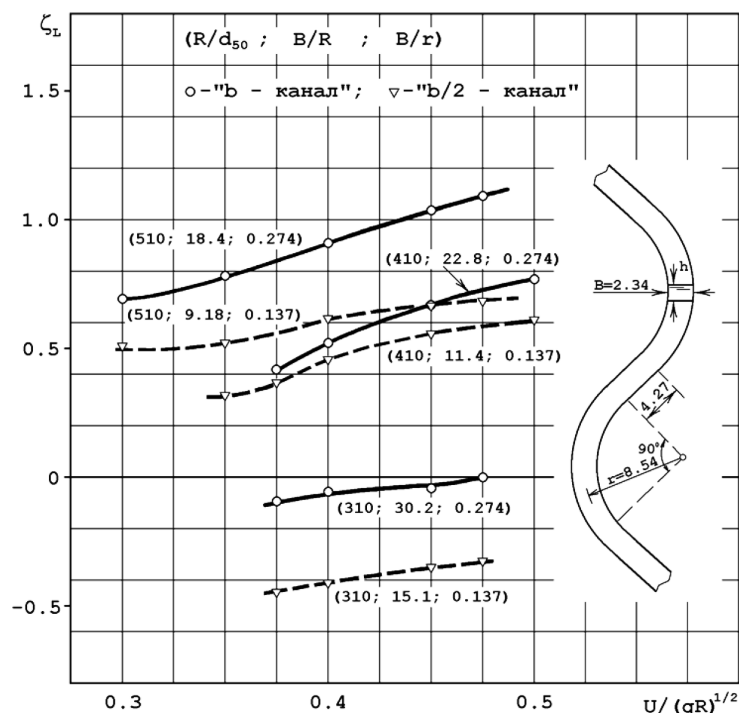


Рис. 3. График функции $\zeta_L = f(U/\sqrt{gR}, R/d_{50}, B/r)$ (по Ониши и др.)

Ониши и другие исследователи пришли к выводу, что основными факторами, влияющими на гидравлическое сопротивление в криволинейных каналах с подвижным дном, являются размеры и форма побочня у выпуклого берега, а также изменения микроформ форм дна (рифели и гряды).

Исследования, выполненные Л. Миккельсеном и Ф. Энгелундом [8], показали, что сопротивление в криволинейных лотках возрастает с увеличением относительной глубины по мере затопления побочня у выпуклого берега. При малых глубинах, когда побочень не затоплен или затоплен слабо, сопротивление изогнутого русла может быть меньше сопротивления прямолинейного русла с теми же осредненными по длине участка глубинами и скоростями течения. При больших глубинах, когда поток перетекает через побочень, сопротивление извилистого русла больше прямолинейного. В публикации [8] также отмечается, что при изучении гидравлического сопротивления на участках изгибов большинство исследователей переоценивают роль вторичных течений. По их оценке, доля дополнительных потерь энергии, обусловленная наличием вторичных течений, составляет около 1 % от суммарных потерь энергии. Так как одним из источников сопротивления потока в меандрирующих руслах является грядовая шероховатость, необходимо рассмотреть процесс формирования гряд в речной извилине. Наиболее полные исследования по этому вопросу, выполненные в работах [9], [10], показали, что в лотках криволинейных очертаний движение наносов принимает разные формы в зависимости от участка поворота. Были выделены три зоны, в которых наблюдаются качественно однородные по характеру формы движения наносов в пределах изгиба русла (рис. 4).

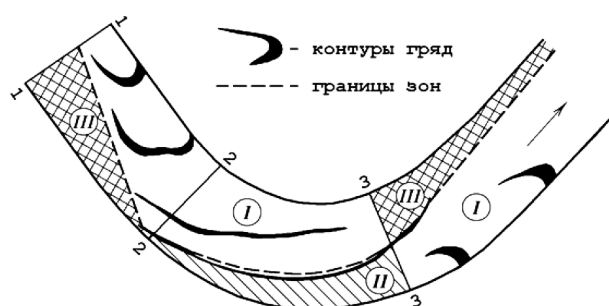


Рис. 4. Деление участка поворота на зоны по характеру движения наносов [9], [10]

Границами зоны I является левый берег в пределах створов 1–3. Формирующиеся в районе створа 1 гряды при своем движении расширяются и перекашиваются. Уменьшение глубин у выпуклого берега сопровождается уменьшением высоты гряд. В створе 2 расход наносов практически равномерно распределен по ширине лотка. Далее от створа 2 до створа 3 наносы резко переходят к вогнутому берегу. В вершине поворота весь твердый расход наносов сосредоточен у этого берега. Таким образом, в пределах зоны I происходит процесс формирования гряд, их движение и исчезновение.

Зона II расположена в вершине извилины. По длине этой зоны происходит увеличение расхода наносов до величины, близкой всему твердому расходу. Поверхностные струи потока в зоне II направлены в сторону вогнутого берега, а донные — к выпуклому. В этой зоне гряды не наблюдаются или имеют небольшую высоту. В створе 3, который является нижней границей зоны, вновь создаются условия для формирования гряд.

У выпуклого берега ниже зоны II в исследованиях [9] и [10] была выделена зона III с характерными для нее малыми глубинами и небольшими значениями жидкого и твердого расходов. Русловыми формами этой зоны являются вытянутые косы, за которыми располагаются затонные участки. Подобная картина наблюдалась также в зоне III между створами 1–2. Таким образом, результаты проведенных исследований [9] и [10] показали, что в отличие от прямолинейных участков русел, где формируется устойчивый грядовой рельеф, в руслах криволинейных очертаний имеются области формирования гряд и их движения, а также обширные зоны (плесовые лощины у вогнутых берегов), где гряды или не наблюдаются совсем, или имеют небольшую высоту. Были про-

ведены исследования сопротивления изгибов на аэродинамических моделях [11], [12]. Опыты с напорными потоками воздуха были выполнены в каналах прямоугольного сечения шириной 40 см и высотой $h = 2,0, 2,5$ и $3,0$ см. Измерения проводились в трех каналах, различавшихся формой в плане (рис. 5). В двух сериях опытов на модели III каналу было придано трапецевидное поперечное сечение. Дно и боковые стенки каналов были изготовлены из пластилина. В одной серии опытов на каждой модели на дно наклеивался песок с медианной крупностью частиц $0,375$ мм.

Кроме моделей криволинейных очертаний была построена прямолинейная модель, имевшая те же поперечные размеры и ту же шероховатость дна и стенок, что у извилистых каналов. Это позволило найти для всех серий опытов значения коэффициента $\zeta_L = (h_{js} - h_s)(2g/U^2)$, который характеризует сопротивление изгиба.

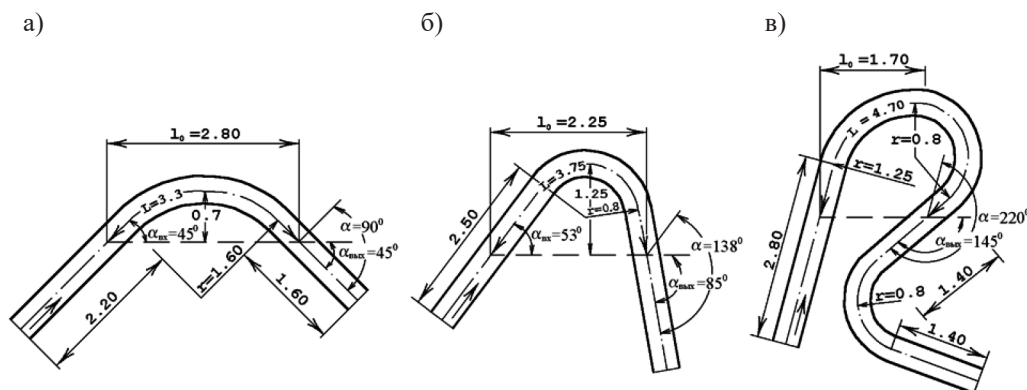


Рис. 5. Плановые очертания модели I (а), II (б), III (в)

Было установлено, что коэффициент ζ_L зависит от трех параметров: коэффициента трения в прямолинейном канале λ , отношения ширины канала к моделирующей глубине B/h_m и развитости извилины L/l_0 . При измерениях в аэродинамических каналах моделирующей глубиной называется расстояние h_m от дна модели до поверхности максимальных скоростей. Развитость извилины представляет отношение длины L по оси русла между точками перегиба к длине прямой l_0 , соединяющей эти точки. График связи $\zeta_L = f(\lambda, B/h_m, L/l_0)$ приведен на рис. 6.

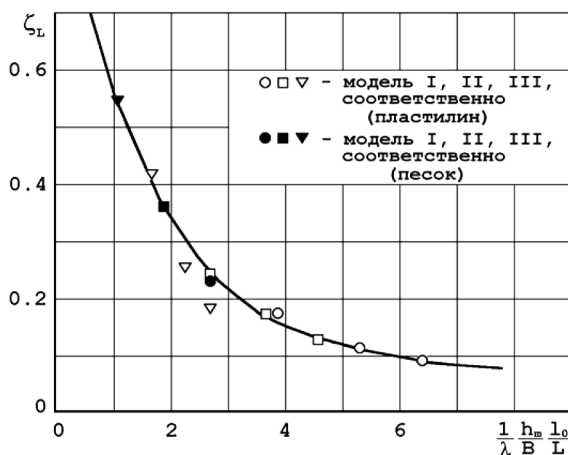


Рис. 6. График функции (5)

Данная зависимость описывается уравнением

$$\zeta_L = 0,63\lambda(B/h_m)(L/l_0). \quad (5)$$

Согласно формуле (5), отрицательные значения k_L невозможны. Опыты, выполненные на жестких моделях, показали, что доля дополнительных потерь энергии на исследованных изги-

бах русла составила 10–20 % от потерь энергии по длине. Сохраняющаяся в настоящее время неопределенность разделения полного сопротивления русла на зернистую и грядовую составляющие и сопротивление формы заставила искать другой подход к составлению формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна.

Основоположником нового направления исследований гидравлического сопротивления речных русел с песчаными донными отложениями является К. В. Гришанин [13], [14], основные идеи которого в построении формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна сводятся к следующему. Искомой величиной является полный коэффициент Шези — C , в качестве главного аргумента которого принимается скорость течения воды, диаметр донных частиц в расчетную формулу не вводится, так как он неявно присутствует, определяя возможные границы применимости формулы. В качестве параметра однозначности, учитывающего различные поперечные размеры потоков, используется отношение B/H . Считается, что перемещение мелких частиц не свободно от влияния вязкости воды. Кроме того, К. В. Гришанин, исключая из формулы для коэффициента Шези диаметр частиц, рекомендует нормировать скорость течения величиной $(gv)^{1/3}$, где v — коэффициент кинематической вязкости воды. Такое решение обусловлено тем, 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. Кроме того, принятое выражение безразмерной скорости есть не что иное, как корень кубический из произведения числа Рейнольдса на число Фруда: $U/\sqrt[3]{gv} = (Re \cdot Fr)^{1/3}$.

На основе данного подхода к составлению формулы гидравлического сопротивления, в публикации [15] была предпринята попытка установить связь между полным коэффициентом Шези для извилистых участков и параметрами потока и русла по натурным данным. Основу расчетов составили материалы натурных наблюдений на отдельных извилинах рек Вятки, Десны, Дона, Иртыша, Луги и Оки. На всех участках дно было сложено мелким и средним песком и наблюдался грядовый транспорт влекомых наносов. Относительная зернистая шероховатость дна была исключена из числа параметров, определяющих значения коэффициента Шези. Отношение r_0/B радиуса кривизны осевой линии русла к его средней ширине в пределах извилины составило у рассматриваемых изгибов 1,46–10,2, а степень развитости L/l_0 — 1,07–2,86.

В качестве параметров, определяющих значения полного коэффициента Шези, были приняты следующие: число Фруда, скорость течения, нормированная величиной кинематической вязкости $U/\sqrt[3]{gv}$, а также безразмерные величины, характеризующие геометрию русла (B/H , B/r_0 , L/l_0 , l_0/B и др.). Величины C , U , H , B и r_0 осреднялись по длине извилины (между точками перегиба осевой линии). Применение метода многофакторного регрессионного анализа позволило установить, что наиболее значимым параметром в данном случае является число Фруда (рис. 7).

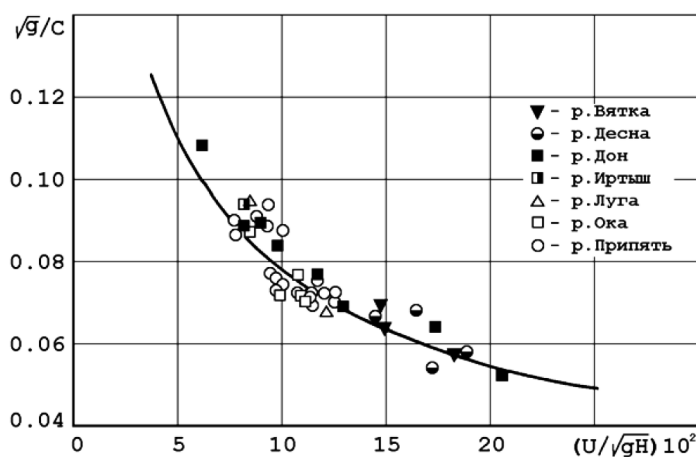


Рис. 7. График функции (6)

Данные по всем исследуемым извилинам хорошо (с коэффициентом корреляции 0,92) удовлетворяют уравнению

$$C / \sqrt{g} = 42,25(U / \sqrt{gH})^{0,53}. \quad (6)$$

Ранее исследуя гидравлическое сопротивление на перекатах, Г. Л. Гладков [16] получил формулу для полного коэффициента Шези вида

$$C / \sqrt{g} = 71,4(U / \sqrt{gH})^{3/4}. \quad (7)$$

График зависимости (7) приведен на рис. 8.

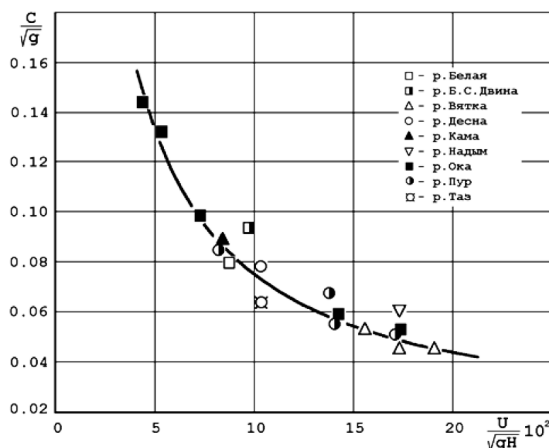


Рис. 8. График зависимости (7)

Показатель степени в формуле (6) меньше, чем показатель степени в формуле Гладкова (7): коэффициент Шези на изгибах русла при изменении числа Фруда изменяется меньше, чем на перекатах. При малых числах Фруда значения коэффициента Шези по формуле (6) меньше, чем по формуле Гладкова, а при больших числах Фруда — больше.

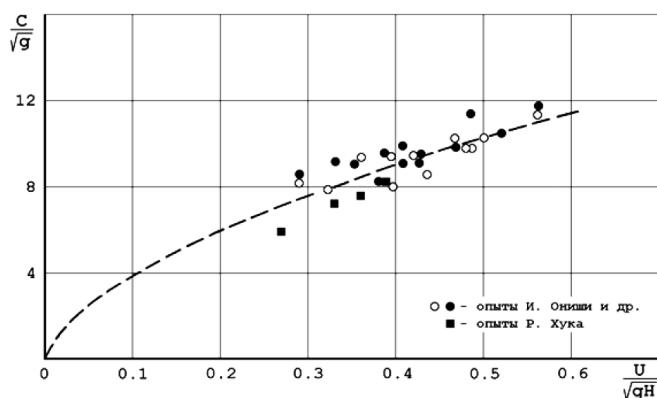


Рис. 9. График зависимости полного коэффициента Шези от числа Фруда

Материалы лабораторных исследований И. Ониши и др. [7] и Р. Хука [17], показали, что опыты в лотках дают степенную функцию примерно с тем же показателем, что и в формуле (6), но с меньшим значением коэффициента пропорциональности (рис. 9).

Как натурным, так и экспериментальным данным удовлетворяет формула

$$C / \sqrt{g} = 1,12(U / \sqrt[3]{g\nu})^{1/2}(r_0 / H)^{1/6}. \quad (8)$$

График зависимости (8) представлен на рис. 10.

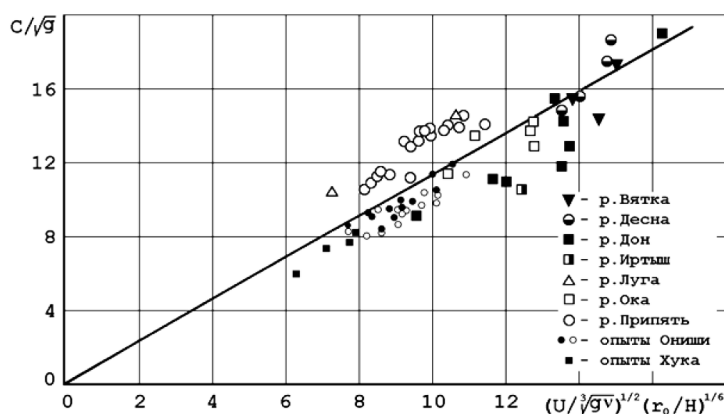


Рис. 10. График функции (8)

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что как натурные, так и лабораторные наблюдения показывают наличие в изогнутых руслах связи между полным коэффициентом Шези и средней скоростью течения вида: $C \sim U^m$, где $m \approx 1/2$. Формулы (6) и (8) действительны для изгибов рек с песчаными донными отложениями.

Заключение (Conclusion)

Необходимо признать, что благодаря исследованиям, выполненным в последние годы, в изучении гидравлического сопротивления изгибов подвижных русел достигнут определенный успех. Лабораторные исследования позволили выявить основные факторы, определяющие гидравлическое сопротивление изгибов речных русел. Этими факторами являются форма и размеры побочня, формирующегося у выпуклого берега, а также грядовый рельеф дна. Добавочное сопротивление, создаваемое изгибом, невелико (в среднем составляет около 10 % от сопротивления прямолинейного русла). Потери энергии на изгибе могут быть как больше, так и меньше потерь на прямолинейном участке с такой же средней глубиной и скоростью течения. Материалы натурных и лабораторных наблюдений позволили установить, что между полным коэффициентом Шези на изгибе и средней скоростью течения существует соотношение пропорциональности: $C \sim U^m$, где $m \approx 1/2$.

Несмотря на достигнутые успехи в ходе проведения исследований проблемы оценки потерь энергии в естественных судоходных реках с подвижным дном (установление прямой связи коэффициента Шези со скоростью течения, а также его тесной связи с относительной длиной гряд, вне зависимости от диаметра частиц, из которых они сложены), остается нерешенным еще ряд вопросов. Основная сложность заключается в том, что русловой поток, взаимодействующий с подвижным дном, самостоятельно регулирует граничные условия своего движения, используя имеющиеся в его распоряжении степени свободы. При этом характер и направленность изменений, происходящих в системе *поток ↔ русло*, до настоящего времени плохо изучены. Разделение гидравлических сопротивлений по длине в зависимости от действующих факторов, таких как зернистость шероховатость дна, грядовое сопротивление и сопротивление формы русла применительно к потокам с деформируемым руслом, является достаточно затруднительным, так как вклад каждой составляющей изменяется по длине реки и зависит от времени, точнее, фазы гидрологического цикла. Поэтому необходимость выделения относительной доли любого из видов сопротивлений движению воды всегда представляет определенную условность.

На реках с мелкозернистыми грунтами предлагается использовать в расчетах зависимости, построенные на основе установленной связи полного коэффициента Шези от скорости течения. Их применение позволит прогнозировать изменение характеристик гидравлического сопротивления с изменением уровня воды, а также оценить реакцию потока на искусственное изменение геометрии русла в результате реализации проектных рекомендаций на участке реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gladkov G. Sediment Transport and Water Flow Resistance in Alluvial River Channels: Modified Model of Transport of Non-Uniform Grain-Size Sediments / G. L. Gladkov [et al.] // *Water*. — 2021. — Vol. 13. — Is. 15. — P. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
2. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
3. 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. 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346. — EDN JFWJDH.
4. 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. — EDN SYRZRR.
5. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов / Пер. с англ. И. В. Филимоновой / В. Т. Чоу. — М.: Стройиздат, 1969. — 464 с.
6. Rouse H. Critical analysis of open channel resistance / H. Rouse // *Proc. ASCE Hydr. Div.* — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 1–23.
7. Onishi Y. Effects of meandering in alluvial streams / Y. Onishi, S. C. Jain, J. F. Kennedy // *Proc. ASCE Hydr. Div.* — 1976. — Vol. 102. — Is. 7. — Pp. 899–917.
8. Mikkelsen L., Engelund F. Flow resistance in meandering channels / L. Mikkelsen, F. Engelund // *Prog. Rep.43. — Ins. Hydrodyn. and Hydr. Eng. Tech. Univ. Denmark*. — 1977. — Pp.7–10.
9. Великанова З. М. Лабораторные исследования речной извилины / З. М. Великанова // *Труды ГГИ*. — 1968. — № 147. — С. 40–52.
10. Великанова З. М. Грядовое движение наносов на модели речной извилины / З. М. Великанова // *Там же*. — 1969. — № 169. — С. 87–96.
11. Журавлев М. В. Лабораторные исследования потерь напора на повороте русла / М. В. Журавлев // *Русловой процесс на реках и путевые работы для судоходства и повышение эффективности работы гидротехнических сооружений: сб. Трудов ЛИВТа*. — 1985. — С. 185–191.
12. Журавлев М. В. Лабораторные исследования гидравлического сопротивления речных извилин / М. В. Журавлев // *Совершенствование технической эксплуатации, проектирования и расчета гидротехнических сооружений и технологии путевых работ на реках: сб. тр. ЛИВТа*. — 1990. — С. 101–106.
13. Гришанин К. В. Как ведет себя речной поток? / К. В. Гришанин // *Метеорология и гидрология*. — 1984. — № 9. — С. 95–100.
14. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков. / К. В. Гришанин. — М.: Транспорт, 1990. — 319 с.
15. Журавлев М. В. Гидравлическое сопротивление на повороте речного русла / М. В. Журавлев // *Повышение пропускной способности портовых и судоходных сооружений: сб. тр. ЛИВТа*. — 1987. — С. 184–190.
16. Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление подвижного русла при низких уровнях воды / Г. Л. Гладков // *Изв. Вузов. Строительство и архитектура*. — 1984. — № 5. — С. 86–89.
17. Hooke R. L. Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend / R. L. Hooke // *J. Geology*. — 1975. — Vol. 83. — Is. 5. — Pp. 543–565.

REFERENCES

1. Gladkov G. “Sediment Transport and Water Flow Resistance in Alluvial River Channels: Modified Model of Transport of Non-Uniform Grain-Size Sediments.” *Water* 13.15 (2021): P. 2038. DOI: 10.3390/w13152038.
2. Grishanin K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
3. Gladkov G. L. “Issledovanie zernistoy sheroховatosti dna rechnykh rusel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 333–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-336-346.
4. Gladkov G. L. “Gidravlichesкое soprotivlenie dvizheniyu vody i transport nanosov v rekah.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2020): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

5. CHou V. T. *Gidravlika otkrytyh kanalov*. Per. s angl. M.: Strojizdat, 1969.
6. Rouse H. "Critical analysis of open channel resistance." *Proc. ASCE Hydr. Div.* 91.4 (1965): 1–23.
7. Onishi, Y., Jain, S.C., Kennedy, J.F. "Effects of meandering in alluvial streams." *Proc. ASCE Hydr. Div.* 102.7 (1976): 899–917.
8. Mikkelsen, L., Engelund, F. "Flow resistance in meandering channels." *Prog. Rep.43. — Ins. Hydrodyn. and Hydr. Eng. Tech. Univ. Denmark.*, 1977: 7–10.
9. Velikanova Z. M. "Laboratornye issledovaniya rechnoj izviliny." *Trudy GGI* 147 (1968): 40–52.
10. Velikanova Z. M. "Gryadovoe dvizhenie nanosov na modeli rechnoj izviliny." *Trudy GGI* 169 (1969): 87–96.
11. ZHuravlev M. V. "Laboratornye issledovaniya poter' napora na povorote rusla." *Ruslovoj process na rekah i putevye raboty dlya sudohodstva i povyshenie effektivnosti raboty gidrotekhnicheskikh sooruzhenij (Sb. Trudov LIVTa)*, 1985: 185–191.
12. ZHuravlev M. V. "Laboratornye issledovaniya gidravlicheskogo soprotivleniya rechnyh izvilin." *Sovershenstvovanie tekhnicheskoy ekspluatatsii, proektirovaniya i rascheta gidrotekhnicheskikh sooruzhenij i tekhnologii putevykh rabot na rekah (Sb. Trudov LIVTa)*, 1990: 101–106.
13. Grishanin K. V. "Kak vedet sebya rechnoj potok?" *Meteorologiya i gidrologiya* 9 (1984): 95–100.
14. Grishanin K. V. *Osnovy dinamiki ruslovykh potokov*. M.: Transport, 1990.
15. ZHuravlev M. V. "Gidravlichesкое soprotivlenie na povorote rechnogo rusla." *Povyshenie propusknoy sposobnosti portovykh i sudohodnykh sooruzhenij (Sb. Trudov LIVTa)*, 1987: 184–190.
16. Gladkov G. L. "Gidravlichesкое soprotivlenie podvizhnogo rusla pri nizkikh urovnnyah vody." *Izv. Vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura* 5 (1984): 86–89.
17. Hooke R. L. "Distribution of sediment transport and sear stress in a meander bend." *J. Geology* 83.5 (1975): 543–565.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2024 г.
Received: September 13, 2024.