

ДИСКУССИИ

УДК 532.5.013.12

А.П. Лепихин

К ПРОБЛЕМЕ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОМОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ РУСЕЛ

Рассмотрены особенности построения гидроморфометрических зависимостей. Показано, что при их формировании ключевую роль играет характер гидравлического сопротивления. Определены роль и влияние грядового и зернистого сопротивления на характер данных зависимостей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: водотоки, гидроморфометрические зависимости, гидравлическое сопротивление.

Гидроморфометрические зависимости типа

$$H(Q) = f_h(Q), V(Q) = f_v(Q), B(Q) = f_B(Q) \quad (1)$$

(где h , B , V – характерные средние значения, соответственно, глубины, ширины и скорости течения на рассматриваемом участке водотока, Q – расход водотока) играют очень важную роль при решении широкого круга задач речной гидравлики. Однако они, как правило, строятся и анализируются на основе анализа эмпирической гидрометрической информации [4; 6; 10–12; 14 и др.]. В то же время совершенно очевидно, исходя из теории развития русловых процессов, что форма русла, соответственно, и зависимости типа (1) являются, в значительной мере, ответной реакцией реки на характер транспортируемого стока.

Вместе с тем в настоящее время мы можем дать ответы только на простейшие вопросы: какова должна быть форма русла для пропуска максимального расхода при заданной площади поперечного сечения, какова должна быть форма прорана в грунтовой плотине, чтобы пропускать максимальный расход и т.д. Решение данной проблемы в значительной мере усложняется вследствие существенной внутригодовой и междугодичной изменчивости стока и существенной неоднородности строения речной долины. Характер данных зависимостей в значительной мере, как показано в [6], определяется структурой функций $V(h)=f_v(h)$, $B(h)=f_B(h)$. В классической работе [11] специальным термином «hydraulic geometry» обозначено построение зависимостей типа (1) с использованием степенной аппроксимации типа

$$V(Q) = P_{VQ} Q^{\alpha_{VQ}}, B(Q) = P_{BQ} Q^{\alpha_{BQ}}, H(Q) = P_{HQ} Q^{\alpha_{HQ}}. \quad (2)$$

При этом, как нетрудно видеть,¹

$$\begin{aligned} P_{VQ} \cdot P_{HQ} \cdot P_{BQ} &= 1 \\ \alpha_{HQ} + \alpha_{VQ} + \alpha_{BQ} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая, что $\alpha_{xy} = \frac{1}{\alpha_{yx}}$, соответственно, как показано в [6], имеем

© Лепихин А.П., 2015

Лепихин Анатолий Павлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук; 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а, Россия, ²Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 614007, г. Пермь ул. Островского, 113, lepihin49@mail.ru

¹ Для достаточно широких естественных водотоков $h \sim R$ (гидравлический радиус). Так, по оценке Williams (1970) рекомендовано

использовать в [16] $R \sim \frac{h}{(1+0,055h/B^2)}$.

Дискуссии

$$\alpha_{vh} = \frac{\alpha_{vQ}}{\alpha_{hQ}}, \alpha_{Bh} = \frac{\alpha_{BQ}}{\alpha_{hQ}}, \alpha_{HQ} = \frac{1}{1 + \alpha_{vh} + \alpha_{Bh}}, \alpha_{BQ} = \frac{\alpha_{Bh}}{1 + \alpha_{vh} + \alpha_{Bh}}, \alpha_{vQ} = \frac{\alpha_{vh}}{1 + \alpha_{vh} + \alpha_{Bh}}. \quad (4)$$

Данная аппроксимация весьма удобна для начального анализа данных задач, используя соотношения (3), (4), в то же время они представляют собой асимптотические приближения в условиях некоторой неполной автомодельности [2].

Также необходимо учитывать, если характер функции $V(h)$ в значительной мере определяется особенностью формирования гидравлического сопротивления в потоке, то функция $B(h)$ определяется значительно большим количеством факторов и, в первую очередь, статистикой и характером прохождения руслоформирующих расходов.

Исходя из схемы А. Шези, имеем $V(h) \sim C(h) \cdot h^{1/2} \sqrt{i}$. При $C(h) = \text{const}$ $V(h) \sim P_{vh} \cdot h^{1/2}$, а используя для аппроксимации $C(h)$ зависимость Р.Маннинга, соответственно, имеем

$$V(h) \cong P_{vh} \cdot h^{1/2+1/6} = P_{vh} \cdot h^{2/3} \quad (5)$$

или, учитывая, что $\lambda = \frac{2g}{C^2}$ ¹ по аналогии с (5), имеем

$$V(h) = 2g \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{i} / \sqrt{\lambda(h)}. \quad (6)$$

В то же время проведенный анализ натуральных данных, представленный в [6; 14], существенно отличается от данных оценок (рис. 1).

Особо наглядно эти различия «теоретических» и «экспериментальных» оценок проявляются в характерных зависимостях построения для отдельных створов. Например, на рис. 2 представлена зависимость средней скорости от глубины потока для реки Кама в створе п.Тюлькино по натурным наблюдениям, рассчитанная по соотношению (4).

В выполненных в последние годы исследованиях [4; 10; 12], предполагается расширить степенные зависимости типа (2), дополнив определяющими параметрами: характерными размерами частиц донных отложений d и уклоном водной поверхности i , используя вместо (2)

$$\begin{aligned} B &\sim P_{B1} \cdot Q^{\alpha_{BQ1}} \cdot d^{\alpha_{Bd}} \cdot i^{\alpha_{Bi}}, \\ H &\sim P_{H1} \cdot Q^{\alpha_{HQ1}} \cdot d^{\alpha_{Hd}} \cdot i^{\alpha_{Hi}}, \\ V &\sim P_{V1} \cdot Q^{\alpha_{vQ1}} \cdot d^{\alpha_{vd}} \cdot i^{\alpha_{vi}}. \end{aligned}$$

При этом, как нетрудно видеть, исходя из свойств степенной зависимости, для достаточно широких русел должны иметь место соотношения:

$$\begin{aligned} \alpha_{BQ1} + \alpha_{HQ1} + \alpha_{vQ1} &= 1, \\ \alpha_{Bd} + \alpha_{Hd} + \alpha_{vd} &= 0, \\ \alpha_{Bi} + \alpha_{Hi} + \alpha_{vi} &= 0. \end{aligned}$$

При этом даже при использовании более расширенных зависимостей, включающих ряд дополнительных параметров, характеризующих подвижность частиц, слагающих донные отложения, необходима оценка характеристик руслоформирующих расходов. В то же время включение дополнительных параметров при ограниченных объемах исходных выборок существенно снижает надежность итоговых статистических зависимостей.

В связи с этим целесообразно на первом этапе рассмотреть характер зависимости $V = f(h)$, определяемый особенностями формирования гидравлического сопротивления в водотоках.

Проблема описания, оценка коэффициента сопротивления для характеристики скорости течения в равномерных, установившихся русловых потоках занимает центральное место в речной гидравлике.

¹ В трубной гидравлике, а также в англоязычной литературе, учитывая, что $h = D/4$, $\lambda = \frac{8g}{C^2}$. Анализ этой ситуации дается в [1].

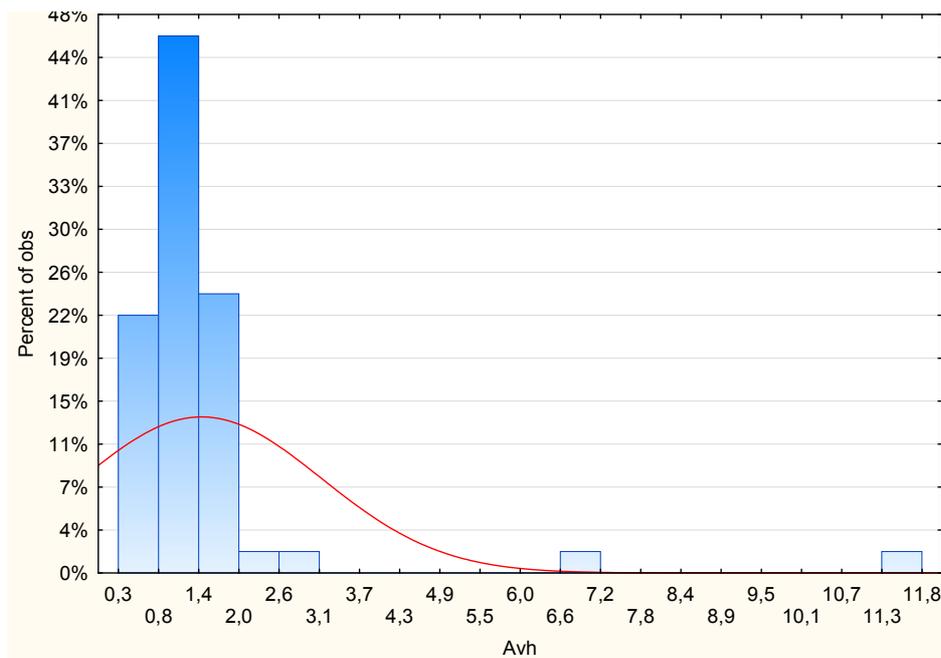


Рис. 1. Гистограмма изменения параметра α_{vh} по материалам натуральных наблюдений [6; 14]

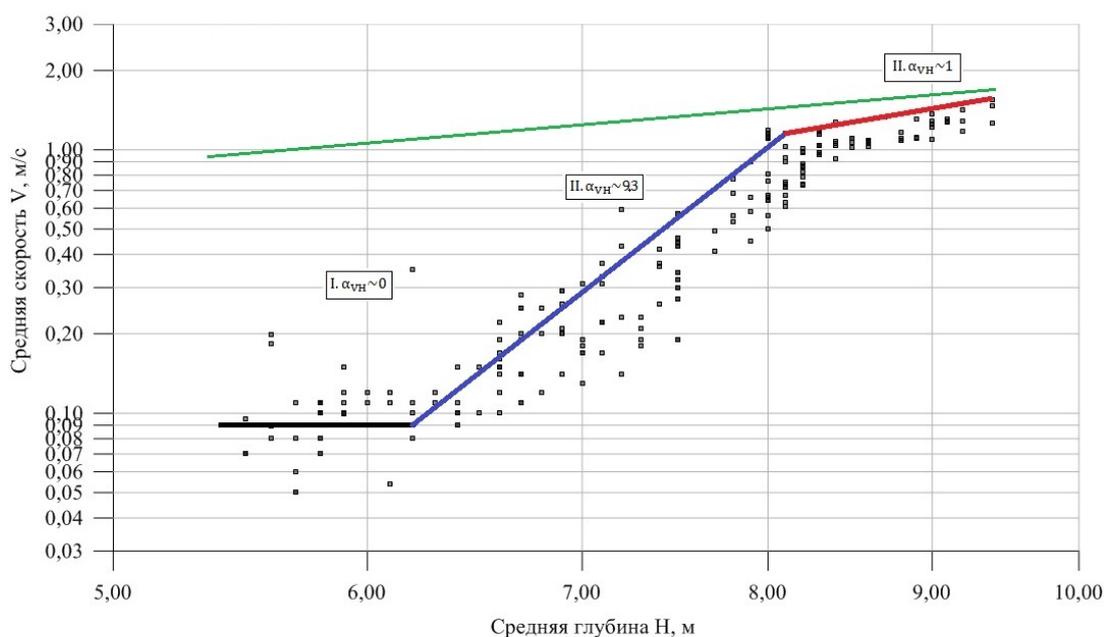


Рис. 2. Степенная аппроксимация зависимости средней скорости от глубины потока, р. Кама – п. Тюлькино, с выделением отдельных участков (α_{vh} – показатель степенной аппроксимационной зависимости): I – зона активного формирования гряд (черная); II – зона разрушения гряд (синяя); III – вторая безгрядовая зона (красная); зеленая линия – по зависимости (4) с использованием соотношения Маннинга

Постановка задачи

Так как механизмы многих процессов, обуславливающих гидравлические сопротивления в русловых потоках, не достаточно изучены, поэтому на начальной стадии следует выполнить анализ размерности, требующий объективности и корректности задания определяющих параметров.

Сложность задачи заключается в том, что даже в равномерном и установившемся прямолинейном потоке, без учета зарастания его русла высшей водной растительностью, может реализоваться несколько механизмов формирования гидравлического сопротивления.

Дискуссии

При этом в качестве параметров, в достаточно полной мере описывающих гидравлическое сопротивление потока, можно принять:

$$\lambda \approx \Phi(V, R, g, \nu, d_{\Delta}, \rho_s, \rho, i, B, \omega_s, S) \quad (6)$$

где V – средняя скорость потока, м/сек; R – гидравлический радиус, м; g – ускорение свободного падения, м/сек²; ν – кинематическая вязкость воды, м²/се; d_{Δ} – характерный размер частиц донных отложений, м; ρ_s – плотность материала частиц, кг/м³; ρ – плотность воды, кг/м³; i – гидравлический уклон потока; B – характерная ширина потока, м; ω_s – гидравлическая крупность взвешенных частиц, м/сек; S – объемная концентрация взвешенных частиц.

Согласно П-теоремы [2] при выборе 11 определяющих параметров и при наличии 3 независимых размерностей они должны быть сгруппированы в $11 - 3 = 9$ безразмерных комплексов:

$$\lambda(V, R, g, \nu, d_{\Delta}, \rho_s, \rho, i, B, \omega, S) \equiv \lambda\left(\text{Re}, \text{Re}_*, \Delta\rho, i, Fr, Fr_*, \frac{d_{\Delta}}{R}, \frac{B}{R}, K_0\right), \quad (7)$$

где $V_* = (g \cdot R \cdot i)^{1/2}$ – динамическая скорость потока;

$\text{Re} = \frac{R \cdot V}{\nu}$ – глобальное число Рейнольдса, представляющее собой отношение сил инерции к

силам вязкости, построенное по параметрам, отнесенным ко всему сечению потока;

$\text{Re}_* = \frac{d_{\Delta} \cdot V_*}{\nu}$ – локальное число Рейнольдса, характеризующее отношение сил инерции к силам

вязкости, построенное по параметрам, характеризующим придонный слой;

$Fr^2 = \frac{V^2}{g \cdot R}$ – глобальное число Фруда, характеризующее отношение силы инерции к силе

тяжести, построенное по параметрам относительно всего сечения потока;

$Fr_*^2 = \frac{V_*^2}{g \cdot d_{\Delta}}$ – локальное число Фруда, характеризующее отношение силы инерции и силы

тяжести, построенное по параметрам, характеризующим придонный слой;

$\frac{d_{\Delta}}{R}$ – относительная шероховатость русла, в ряде литературных источников рассматривается как

число Штриклера;

$\Delta\rho = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)$ – относительная плотность частиц;

$\frac{B}{R}$ – параметр формы поперечного сечения русла;

$K_0 = \frac{g \cdot H \cdot \omega \cdot S}{V_*^3}$ – число Колмогорова [2], характеризующее долю турбулентной энергии,

расходуемой на взвешивание частиц.

Данные показатели тесно связаны с критериями, используемыми в гидродинамике и динамике

речных потоков, таких как $\frac{\text{Re}_*^2}{Fr_*} = Ga$ – число Галлея, которое характеризует отношение сил тяжести

и вязкости, при этом $Ga \cdot \Delta\rho = Ar$ – число Архимеда.

В то же время $Ar^{1/3} = D_*$ – число Боннефилле, широко используемое в динамике русловых потоков для характеристики устойчивости частиц на дне потока; $\frac{Fr_*}{\Delta\rho} = 1/\theta$ – число Шильдса,

которое характеризует отношение сдвигающих и удерживающих сил частиц на дне потока, при этом

$$D_* = \left(\frac{Re_*}{\sqrt{\theta}} \right)^{2/3}.$$

Как показали детально выполненные эксперименты, в первую очередь Шильдсом [13], Кнорозом [5], $\theta_{кр} = \varphi(Re_*, Fr_*)$. При этом может реализоваться несколько механизмов гидравлического сопротивления. В первую очередь, можно выделить следующие механизмы гидравлического сопротивления: 1) на гладкой стенке (вязкий подслои); 2) на неподвижной шероховатости; 3) на грядовых структурах; 4) на когерентных структурах; 5) на транспортировке взвешенных наносов.

В качестве первого приближения принимается аддитивность их взаимодействия $\lambda_{нач} = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ [3].

Каждый из этих комплексов или их групп описывает определенные режимы формирования гидравлического сопротивления. При этом для решения поставленной задачи установления характера зависимостей $f_{vh}(h)$ определяющую роль играют первые три механизма.

В условиях неполной автомодельности в первом приближении для отдельного типа гидравлического сопротивления, в общем случае, имеем

$$\lambda \approx Re^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{\Delta}{R} \right)^{\alpha_2} \cdot Re_*^{\alpha_3} \cdot Fr_*^{\alpha_4} \cdot Fr_*^{\alpha_5} \cdot \left(\frac{B}{R} \right)^{\alpha_6} \cdot Ko^{\alpha_7}. \quad (8)$$

Однако такая конструкция для решения практических задач малоэффективна. Из-за большого количества входящих в нее параметров ее калибровка весьма затруднена. В то же время степенная аппроксимация, как следствие неполной автомодельности, приемлема только для описания асимптотик.

В связи с этим особое значение имеет анализ отдельных частных случаев. Рассмотрим отдельные частные случаи, когда значения α_i не равны нулю.

В простейшем случае, при $Re \rightarrow 0$ и отсутствии в потоке взвешенных наносов, в условиях доминирования физической вязкости в формировании гидравлического сопротивления, т.е. течение является ламинарным, имеем при $\alpha_1 \sim -1$, $\alpha_2 \sim \alpha_3 \sim \alpha_4 \sim \alpha_5 \sim \alpha_6 \sim \alpha_7 \approx 0$, $\lambda_{лам} \sim K/Re$. Согласно оценкам [3] $K \sim 4$.

В то же время при $Re \gg 1$, при $\left(\frac{Re}{Re_{кр}} \right) > 1$, где $Re_{кр}$ – критическое значение числа Рейнольдса,

характер течения в водотоке, как известно, принципиально меняется. В этом случае трансформация механической энергии потока в тепловую происходит через диссипацию энергии турбулентности.

Если ложе русла гидравлически гладкое, т.е. $Re_* \ll 1$, характерные размеры донных частиц

меньше толщины вязкого подслоя $\Delta \approx \frac{\nu}{V_*} \sim \frac{\nu}{(R \cdot i \cdot g)^{1/2}}$, гидравлическое сопротивление становится

полностью автомодельным относительно $\frac{\Delta}{R}$, а коэффициент α_2 в этом случае стремится к нулю.

Определяющим параметром в этом случае становится Re , а $|\alpha_3| > 0$, $\alpha_1 \sim \alpha_2 \sim \alpha_4 \sim \alpha_5 \sim \alpha_6 \approx 0$.

Данная оценка согласуется с классической оценкой Блазиуса [7]: $\alpha_3 \sim -\frac{1}{4}$, соответственно

$$\lambda_{\text{тур}} = \frac{0.316}{Re^{1/4}}.$$

При $Re_* \gg 1$ ложе водотока становится гидравлически шероховатым. Определяющим параметром является относительная шероховатость $\left(\frac{\Delta}{R}\right)$, а величина гидравлического сопротивления становится полностью автомодельной относительно Re , т.е. $\alpha_1 \rightarrow 0$.

Так как $\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda}} = \left(\frac{V_{cp}}{V_*}\right)$, то нетрудно видеть, что параметр α_2 должен зависеть от характера

изменения скорости потока по глубине.

Как показано в [3], исходя из модели неполной автомодельности, следует

$$\frac{V(y)}{V_*} = \left(\frac{y}{\Delta}\right)^{1/\gamma} + P. \quad (9)$$

Данное соотношение очень хорошо подтверждено многочисленными натурными данными [2; 3; 7], где $\gamma \sim 6$, а $P \sim 8.5$. При этом из соотношения (9) следует, что $\alpha_2 \approx \frac{1}{\gamma}$. При $\gamma \sim 6$ данное соотношение совпадает с известной формулой Р. Маннинга.

В работе [8] дается обоснование модели Р. Маннинга для оценки коэффициента Шези исходя из модели локальной турбулентности, предложенной А.Н. Колмогоровым.

Подвижность частиц донных отложений обуславливает формирование донных микро- и мезорельефов, определяющих грядовое сопротивление.

Зависимости типа (8), хотя и достаточно универсальны, однако они не конструктивны. Так как, с одной стороны, из-за большого количества в них параметров, их очень сложно откалибровать на основе ограниченного объема исходных данных, однако, с другой стороны, автомодельные зависимости корректны при монотонном типе характера изменения рассматриваемых функций.

В то же время совершенно очевидно, что такие допущения приемлемы для отдельных частных случаев. При решении практических задач с использованием схем типа (8) наиболее простым и доступным подходом для снятия данного ограничения является установление диапазонов, где отдельные определяющие параметры могут рассматриваться как полностью автомодельные.

Если в рассматриваемом диапазоне изменения исходных параметров не соблюдаются данные условия, то такие схемы в общем случае некорректны. Достаточно ярко эти особенности проявляются при грядовом сопротивлении, когда отчетливо выделяются стадия безгрядового режима, стадия роста гряд, стадия их разрушения, второй безгрядовый режим.

С приобретением подвижности частицами донных отложений при $\psi = \frac{Fr_*^2}{1/\Delta\rho} > \psi_{кр}(Re_*)$ (где

$\psi_{кр} = \frac{1}{\theta_{кр}}$, а $\theta_{кр}$ - критическое значение числа Шильдса) на дне потока начинают формироваться

грядоподобные структуры, существенно влияющие на гидравлическое сопротивление водотока. При

дальнейшем возрастании скорости потока, при $\frac{V_*}{\omega} > 1$, начинается процесс разрушения гряд, переход

частиц из влекомого во взвешенное состояние. Соответственно, и грядовое сопротивление, обуславливаемое размерами гряд, также будет снижаться.

Данное представление формирования грядового сопротивления достаточно хорошо описывается уравнением (10). При этом в качестве определяющего параметра используется показатель

$$\varphi = \frac{\psi - \psi_{кр}}{\psi_{кр}}, \varphi \geq 0, \text{ где } \psi = \left(\frac{h \cdot i}{d} \right) \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) = 1/\theta.$$

Для того чтобы обеспечить полную автомодельность коэффициента грядового сопротивления $\lambda_{gp}(\varphi)$ от всех определяющих параметров за исключением φ , целесообразно рассматривать не изменения самого коэффициента, а его относительное изменение в зависимости от φ , т.е.

$$\frac{d\lambda_{gp}}{\lambda_{gp} d\varphi} = 1/\varphi - \beta. \quad (10)$$

Решая (10) относительно λ , имеем

$$\lambda_{gp}(\varphi) \cong K \cdot \varphi \cdot \exp(-\beta\varphi). \quad (11)$$

При этом коэффициент $K = \text{const}$ и определяется отношением высоты гряд к глубине потока.

Учитывая, что $\sum \lambda = \lambda_{зеп} + \lambda_{гр}$, данная модель позволяет в зависимости от характера грядового сопротивления значительно более адекватно описывать характер зависимостей $V(h)$ (рис. 3).

Данная модель объясняет появление в качестве определяющих параметров d, i в зависимостях типа (10), предложенных в [4; 10; 12]. Она достаточно хорошо согласуется с современными схемами оценки суммарного зернистого и грядового сопротивления.

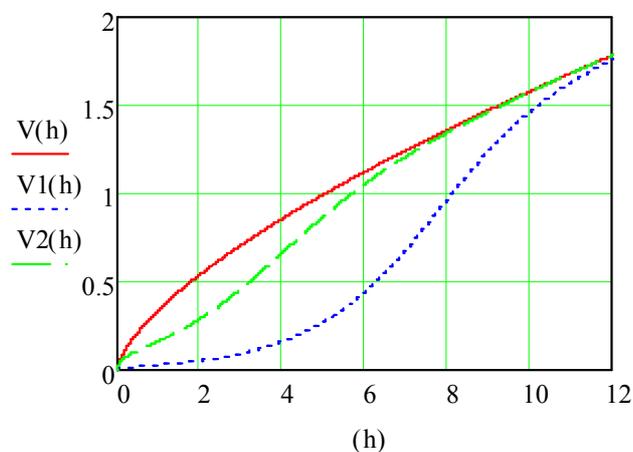


Рис. 3. Зависимости средней скорости потока от глубины при различных вкладах грядового сопротивления в формирование суммарного гидравлического сопротивления: $V(h)$ – грядовое сопротивление отсутствует (схема Маннинга); $V1(h)$ – грядовое сопротивление в рассматриваемом диапазоне глубин играет доминирующую роль; $V2(h)$ – некоторый промежуточный вариант

Достаточно детальный анализ формирования гидравлического сопротивления при доминировании зернистого и грядового сопротивления дано в [9; 15; 17] и др. При решении практических задач принципиальное значение имеет оценка суммарного сопротивления, обусловленного как зернистой, так и грядовой шероховатостью. Так как параметры зернистого и грядового сопротивления тесно связаны между собой, а само грядовое сопротивление значимо только в определенном диапазоне определения его параметров, то весьма удобно использовать представление:

Дискуссии

$$\lambda\left(\frac{\Delta}{H}, \psi\right) = \lambda\Delta\left(\frac{\Delta}{H}\right) \left(1 + \frac{\lambda_{sp}(\psi)}{\lambda\Delta\left(\frac{\Delta}{H}\right)}\right). \quad (12)$$

Соответственно, для коэффициента Шези

$$C\left(\frac{\Delta}{H}, \psi\right) \sim \frac{C\Delta}{(1 + f(\psi))^{1/2}}, \quad (13)$$

где $f(\psi) = \frac{\lambda_{mp}(t)}{\lambda\Delta}$, ψ – параметр, характеризующий подвижность частиц донных отложений.

В зависимости от характера параметра ψ конкретные расчетные соотношения, предлагаемые различными авторами, несколько различаются.

Наибольшую известность получили схемы оценки коэффициентов грядового сопротивления, предложенные Ван Рейном [15], Каримом [9], Ву Ванга [17]. Анализ эффективности данных моделей дается в [18].

В основе схемы оценки грядового сопротивления, предложенного Ван Рейном [15], лежит относительная высота гряд, оцениваемая через параметр

$$T = \frac{V_*^2}{V_{*кр}^2} - 1, \quad (14)$$

где $V_{*кр}$ – критическая динамическая скорость (параметр Шильдса), при этом

$$\Delta h/h = 0.11 \cdot \left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0.3} \cdot (1 - \exp(-0.5T)) \cdot (25 - T). \quad (15)$$

При этом эффективная толщина «слоя» шероховатости оценивается как

$$K_s = 3d_{90} + 1.1\Delta h \cdot (1 - \exp(-\frac{3.12\Delta}{h})), \quad (16)$$

коэффициент Шези, соответственно, оценивается как

$$C = 18 \cdot \lg \frac{12 \cdot R}{K_s}. \quad (17)$$

Зависимость $\frac{\sum \lambda(T)}{\lambda\Delta} = \frac{\lambda_{гр}}{\lambda\Delta} + 1$, построенная по модели (17) с учетом соотношений (14-16) при

$h=1\text{м}$, представлена на рис. 4.

В основе схемы Карима [9] также лежит относительная высота гряд и оценивается как

$$(\Delta h/h) = -0,04 + 0,294 \left(\frac{V_*}{\omega_s}\right) + 0,00316 \left(\frac{V_*}{\omega_s}\right)^2 - 0,0319 \left(\frac{V_*}{\omega_s}\right)^3 + 0,0272 \left(\frac{V_*}{\omega_s}\right)^4, \quad (18)$$

где ω_s – гидравлическая крупность частиц донных отложений.

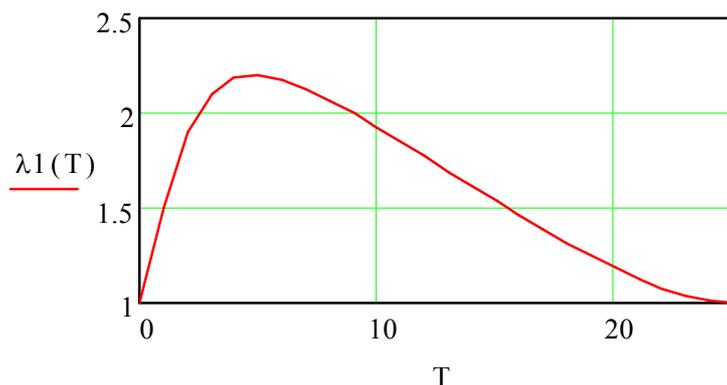


Рис. 4. Зависимость коэффициента относительного гидравлического сопротивления $\frac{\sum \lambda(T)}{\lambda \Delta}$ модели Ван Рейна [15] (при $h=1\text{м}$)

Параметр гидравлической шероховатости n_1 оценивается как

$$n_1 = 0.037d_{50}^{0.126} (1.20 + 8.92\Delta/h)^{0.465}, \quad (19)$$

а коэффициент Шези оценивается, соответственно, по соотношению Маннинга

$$C = H^{1/6}/n_1. \quad (20)$$

Зависимость $\frac{\sum \lambda(\eta')}{\lambda \Delta} = \frac{\lambda_{\text{тр}}}{\lambda \Delta} + 1$, построенная по модели (18-20) при $h=1\text{м}$, представлена на рис. 5.

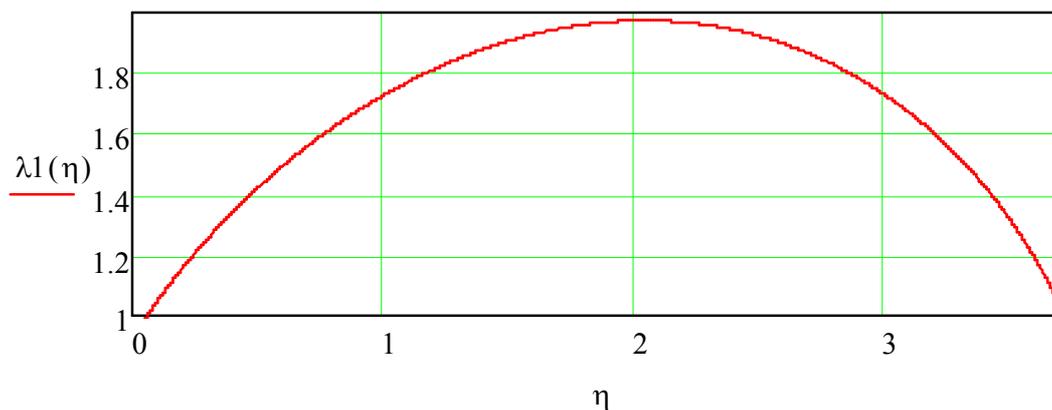


Рис. 5. Зависимость коэффициента относительного гидравлического сопротивления $\frac{\sum \lambda(\eta')}{\lambda \Delta}$ от $\eta' = V_*/\omega_S$ по модели Карима [9] (при $h=1\text{м}$)

В отличие от рассмотренных выше моделей, модель Ву Ванга [17], кроме показателя характерной устойчивости частиц на дне потока, включает в себя также число Фруда. При этом по [17],

$$n = \frac{d^{1/6}}{An(\theta)}, \quad (21)$$

Дискуссии

где $\frac{An}{g^{1/2}Fr^{1/3}} = \frac{8(1 + 0.0235\theta^{1.25})}{\theta^{1/3}}$, $\theta \cong \frac{V_*^2}{V_{*кр}^2}$, $V_{*кр}(Re_*)$ – критическая динамическая скорость

(показатель Шильдса).

Соответственно, зависимость эффективного коэффициента $\frac{\sum \lambda(\theta)}{\lambda\Delta}$ от показателя θ имеет следующий вид (рис. 6).

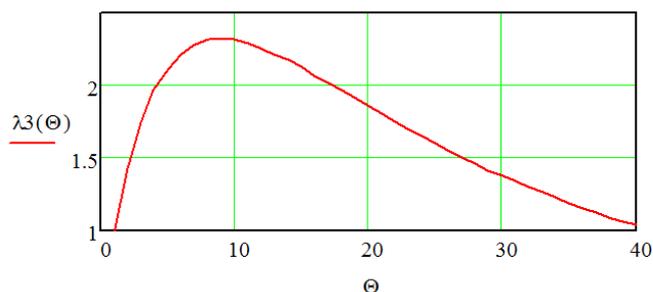


Рис. 6. Изменение эффективного коэффициента сопротивления $\frac{\sum \lambda(\theta)}{\lambda\Delta}$ от θ по модели Ву Ванга [17] (при $h = 1\text{м}$)

Использование соотношения (11) и близких к нему моделей для оценки гидравлического сопротивления с учетом грядового позволяет не только построить значительно более гибкие зависимости для оценки $V(h)$ (рис. 7), но и объяснить весьма широкий диапазон коэффициентов α_{vh} , следуемый из анализа натуральных данных (рис. 1).

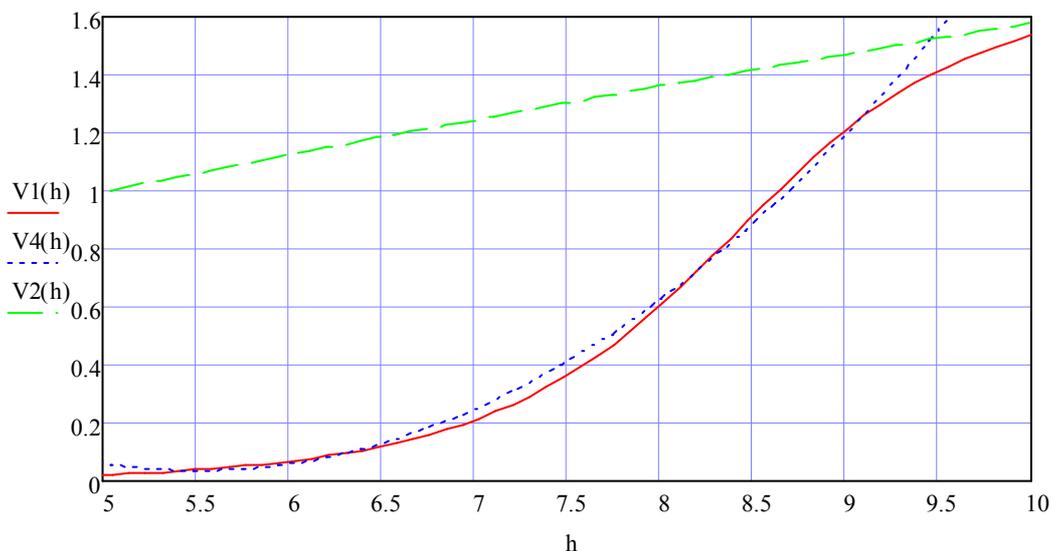


Рис. 7. Зависимость средней скорости потока от глубины для р. Кама в створе п. Тюлькино; $V4(h)$ – аппроксимация по фактическим данным; $V2(h)$ – зависимость как следствие схемы Маннинга; $V1(h)$ – при использовании для оценки грядового сопротивления модели (11)

Выводы

Характер гидроморфометрических зависимостей типа $V(Q)=f_{vQ}(Q)$, $h(Q)=f_{hQ}(Q)$, $B(Q)=f_{BQ}(Q)$ в значительной мере определяется структурой зависимостей $V(h)=f_{vh}(h)$, $B(h)=f_{Bh}(h)$. При этом, если зависимость $f_{vh}(h)$ определяется особенностями формирования гидравлического сопротивления

потока, то соотношение $f_{Bh}(h)$ – особенностями статистик прохождения руслоформирующих расходов.

Учет грядового сопротивления позволяет значительно более корректно подойти к проблеме построения гидроморфометрических зависимостей для естественных русловых потоков, объяснить разнообразие зависимостей $V(h)=f_{vh}(h)$.

Библиографический список

1. Айвазян О.М. Основы гидравлики равномерных течений // Регулярная и хаотическая динамика. М.: Ижевск, 2006. 152 с.
2. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 254 с.
3. Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русловых потоков. СПб., 1992. 181 с.
4. Киселев Д.В., Земцов В.А. Гидроморфометрические зависимости для рек Томской области // Вестник Томского университета. 2012. № 355. С. 169–173.
5. Кнороз В.С. Влияние макрошероховатости русла на его гидравлические сопротивления // Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники: тр. лаборатории плотин и гидроузлов. М., 1959. Т. 62. С. 75–96.
6. Лепихин А.П. Особенности гидравлико-морфометрических зависимостей для естественных русловых потоков // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. 2008. № 3. С.12–25.
7. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.
8. Gioia G., Bombardelli F.A. Scaling and Similarity in Rough Channel Flows // Physical review letters. 2002. № 1.
9. Karim F. Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows // J. Hydraulic Eng. ASCE. 1995. V. 121 (1). P. 15–25.
10. Lee Jorg-Seok, Julien Piere Y. Downstream Hydraulic Geometry of Alluvial Channel // Journal of Hydraulic Engineering. 2006. V. 132. № 12. P. 1347–1352.
11. Leopold L.B., Maddock T.J. Hydraulic Geometry of stream Channels and Some physiographic implications // U.S. Geological Survey Professional Paper. 1953. № 252. 55 p.
12. Piere Y Julien, J Wargadalam Alluvial channel geometry: Theory and applications // Journal of Hydraulic Engineering. 1995. V. 121 (4). P. 312–325.
13. Sheilds A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen d. Preuss. Versuchsansta f. Wasserbau u. Schiffbau. Berlin, 1936. H. 26.
14. Singh V.P. On the Teorels of hydraulic geometry // International Journal of sediment Research. 2003. V. 18. № 3. P. 196–218.
15. Van Rijn L.C. Sediment transport part III: bed forms and alluvial roughness // J. Hydraulic Eng. ASCE. 1984. V. 110 (112). P. 1733–1754.
16. Williams G.P. Bank-full discharge of river // Water Reour.Res. 14 (6). P.1141-1154.
17. Wu W., Wang S.S.Y Movable bed roughness in alluvial rivers // J. Hydraulic Eng. ASCE. 1999. V. 125 (12). P. 1309–1312.
18. Wu W. Computational River Dynamics 2002. Taylor Francis London / Lehen / New York, 2002. 487 p.

A.P. Lepihin

ON THE PROBLEM BUILDING OF THE MORPHOMETRIC RELATION FOR ALLUVIAL RIVER CHANNELS

The features of the building of the hydromorphometric relations are considered. It is shown, that at their formation is key the character of hydraulic resistance. The role and influence of ridge and granular resistance on the nature of this relations are examined.

Key words: water course, hydromorphometric relations, hydraulic resistance.

Anatoly P. Lepihin, D.Sc. Professor, Head of Laboratory; FGBUN Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 78a, Siberian, Perm, 614007 Russia; lepihin49@mail