

З. Ганиев Р. Ф., Низамов Х. Н., Дербуков Е. И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий на трубопроводах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. – 260 с.

Материал поступил в редакцию 25.05.11.
Бегляров Давид Суменович, доктор технических наук, профессор
Греков Дмитрий Михайлович, аспирант
Тел. 8(499)976-11-85

УДК 502/504:627.13

М. А. ВОЛЫНОВ

Государственное научное учреждение

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. А. Костякова

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

В статье анализируются известные эмпирические зависимости разных авторов, описывающие взаимосвязь основных гидравлических параметров потоков в открытых саморегулирующихся руслах. Показано, что коэффициент C в формуле для средней скорости Шези зависит только от уклона дна русла и может определяться без использования в расчетах понятия «шероховатость русла».

Расход, средняя скорость, глубина потока, формула Шези, коэффициент Шези, уклон дна, гранулометрический состав донного грунта, шероховатость, ширина русла.

The well known empirical dependencies of different authors are analyzed which describe the relationship of flow main hydraulic parameters in open self-regulating beds. It is shown that in the Chezy formula for an average velocity the factor C depends only on the river bed's slope and in estimations it can be determined without usage of the concept "river bed's roughness".

Discharge, average velocity, depth of the flow, Chezy formula, Chezy factor, bed slope, granulometric composition of the bed ground, roughness, depth of the river bed.

Основной вопрос, который возникает при исследовании течений в открытых руслах, состоит в определении проходящего расхода или средней скорости (при заданном уклоне и наполнении). Там, где это возможно, расход определяется путем измерения скоростей в отдельных точках живого сечения потока. Во многих случаях расход приходится находить расчетом посредством определения средней скорости.

Для искусственных каналов с помощью полумпирической теории турбулентности ранее была получена зависи-

мость для определения коэффициента C в формуле Шези $V = C\sqrt{Ri}$ в следующем виде [1]:

$$C = 20 \lg \left[R / \left(E + 0,004 / \sqrt{Ri} \right) \right], \text{ м}^{1/2}/\text{с} \quad (1)$$

где R – гидравлический радиус, мм; E – приведенная местная шероховатость, мм (величина, пропорциональная средней высоте выступов); i – уклон дна русла.

Формула (1) представляет собой обобщенную зависимость, действующую во всей области турбулентного течения и хорошо подтвердившуюся многочисленными опытными данными [1–3].

Дальнейшие исследования показали, что зависимость (1) можно заменить более простой степенной формулой [2]:

$$C = 25 \left[R / \left(k_s + 0,025 / \sqrt{Ri} \right) \right]^{\frac{1}{6}}, \quad (2)$$

где k_s – эквивалентная равномерно зернистая шероховатость (шероховатость Никурадзе).

Формулы (1) и (2) действительны для установившегося равномерного течения воды в жестких руслах. Использование этих формул для расчета течений в естественных руслах сопряжено с рядом трудностей. В естественных руслах редко наблюдается установившееся движение, а еще реже равномерное. Значительные затруднения вызывает также правильная оценка значения шероховатости естественных русел. Шероховатость должна учитывать не только все особенности русла реки, но и особенности формы живого сечения, которые лишь приблизительно учитываются введением гидравлического радиуса. Обычно имеющиеся в естественных потоках неправильности сечения находят отражение в увеличенном значении шероховатости.

Шероховатость зависит также от величины, формы и расположения частиц донного грунта и может сильно изменяться вдоль течения реки и по ширине ее русла, а также при изменении расхода. При изменении проходящего расхода изменяется крупность и характер расположения частиц донного грунта, т.е. шероховатость не может приниматься постоянной даже для заданного створа.

Шероховатость для заданной реки определяются путем непосредственных измерений. При этом нужно иметь в виду, что ее значение во многом зависит от ошибок в определении уклона свободной поверхности воды и других гидравлических параметров речного потока. С учетом отмеченных сложностей в определении шероховатости были предприняты попытки вывести формулы для определения средней скорости течения в естественных водотоках, не включающих шероховатость.

Первая удачная попытка в этом направлении была сделана чешским ученым Зидеком в начале прошлого века [2]. Зидек исходил из предположения, что в естественном потоке шероховатость, учитывающая суммарное влияние всех нарушений течения, тесно связана с характером этого потока (его уклоном, шириной,

глубиной и т.д.) и находит свое отражение в изменении указанных величин.

Действительно, известно, что шероховатость возрастает с крупностью наносов, т.е. от устья к истоку, а средняя глубина или гидравлический радиус в том же направлении непрерывно убывают. Таким образом, относительная шероховатость представляет собой функцию положения данного сечения по длине реки. Точно также и уклон находится в зависимости от положения сечения, убывая от истока к устью. Эта аналогия между уклоном и относительной шероховатостью не является случайной – она имеет глубокие физические основания, так как уклон, крупность наносов и глубина потока в саморегулирующихся руслах взаимно влияют друг на друга. Иными словами, в естественных саморегулирующихся руслах масштаб шероховатости k находит отражение в величине уклона:

$$k = f(R, i). \quad (3)$$

Путем обработки натурных данных по европейским рекам Зидек предложил эмпирические формулы для определения вида функции (3), а затем, сопоставляя (3) с формулой Шези, получил следующую зависимость:

$$V = f(h, i, B).$$

По тому же пути шли Германек, Гессле, Матакевич, Линдлоу, Греггер, Христен и другие [3–8].

Винкель, использовавший понятие о высоте выступов шероховатости (абсолютная шероховатость), введенное Мизесом, а также представление о размерностях, пришел к следующему выводу [9, 10]:

$$i = f\left(\frac{k}{R}\right). \quad (4)$$

Для определения вида функции (4) он использовал опытные данные, учитывая, что все измерения, проведенные при одинаковых уклонах, должны показывать примерно одинаковое значение относительной шероховатости.

Предельная скорость обтекания лежащих на дне зернистых частиц (так называемая донная скорость), отвечающая состоянию их предельного равновесия, как известно, равна [11]:

$$U_{d0} = A \sqrt{gd},$$

где d – диаметр частицы; A – коэффициент, значение которого может зависеть от условий обтекания (например, распределения скоростей), характеризующихся числом Рейнольдса.

Между донной и динамической скоростями существует простая связь [12]:

$$U_{д0} = \beta U = \beta \sqrt{gRi},$$

где β – универсальная постоянная (вторая константа турбулентности).

Сравнивая донную и динамические скорости, находим:

$$i_0 = \frac{A^2 d}{\beta^2 R} = \alpha \frac{d}{R}, \quad (5)$$

где i_0 – уклон, отвечающий состоянию предельного равновесия лежащих на дне частиц.

М. М. Гришин еще в 1936 году пришел к выводу о том, что между диаметром частиц, глубиной и уклоном существует аналогичная (5) связь [13].

Учитывая, что между диаметром частиц d и эквивалентной равноразмерной шероховатостью k_s существует зависимость $d = mk_s$,

находим, что

$$k_s = \frac{d}{m} = \frac{Ri_0}{\alpha m} = m_1 Ri_0 \quad (6)$$

где m – коэффициент, зависящий от формы частиц.

Формула (6) раскрывает вид функции (4), устанавливая искомую связь между k_s , R и i . Для определения значения коэффициента m_1 имеем в виду, что

$$m_1 = \frac{1}{\alpha m} = \frac{\beta^2}{A^2 m} = \frac{m}{a_1^2}.$$

Подстановка значения коэффициента m_1 , найденного из опытных данных, позволяет получить следующую зависимость:

$$\frac{k_s}{R} = 65i. \quad (7)$$

Формула (7) подтверждается имеющимися опытными данными. Так, С. Т. Алтунин на основе данных по рекам Средней Азии установил эмпирическую зависимость между крупностью донных частиц и уклоном реки [14]: $d = 4210 i^{0,9}$.

Эта зависимость, полученная на основании данных наблюдений, охватывающих крупность частиц от 0,1 до 300 мм, достаточно удовлетворительно подтверждает пропорциональность среднего диаметра донных частиц уклону русла.

Зависимость (5) можно получить, если рассмотреть связь между предельной влекущей силой

$$S_0 = \gamma Hi \quad (8)$$

и крупностью передвигаемых частиц. Так, для приближенного определения S_0 рекомендуемое соотношение следующее:

$$S_0 = 62d, \text{ кг/м}^2. \quad (9)$$

Сравнивая (8) и (9), приходим к следующему заключению:

$$d = \frac{\gamma Hi}{62}, \text{ или } d \approx 26Hi.$$

Мейер-Петер, Фавр и Г. Эйнштейн на основе тщательных опытов в искусственном русле получили эмпирическое условие для начала движения донных наносов, состоящих из первичных пород с удельным весом $\gamma_H \approx 2,6 \cdot 10^4 \text{ н/м}^3$, которое имеет вид [15]:

$$i \geq 16,1 \frac{d}{q^{2/3}}, \quad (10)$$

где q – расход на 1 м ширины реки, кг/с; d – диаметр частиц, мм.

Пользуясь формулой Штриклера [16]

$$C = 21,1 \sqrt{\frac{h}{d}},$$

условие (10) можно преобразовать:

$$i \geq 16,1 \frac{d}{(C\sqrt{hi} \cdot h)^{2/3}} \cong \frac{1}{i^{1/3}} \left(\frac{d}{h}\right)^{10/9},$$

$$\text{или } i \geq 0,0555 \left(\frac{d}{h}\right)^{5/6}.$$

Б. И. Студеничников на основании опытных материалов предложил следующую формулу [17]:

$$h = \left[\frac{nd^{0,25}}{\sqrt{i}} \right]^{1/0,25+y}, \quad (11)$$

где y – показатель степени в формуле Павловского.

Учитывая существование связи $n \approx k^y$, формулу (11) можно представить так:

$$H = \frac{k^{0,25+y} \cdot d^{0,25+y}}{i^{2(0,25+y)}}.$$

Принимая во внимание, что $y = 1/6 \dots 1/5$ и учитывая, что $d \approx k$, из этой формулы получим: при $y = 1/6$ $h = d/i^{1,20}$, а при $y = 1/5$ $h = d/i^{1,1}$, т.е. вновь проявляется пропорциональность, существующая между средним диаметром русловых частиц и уклоном дна русла.

Таким образом, приведенные данные теоретических исследований подтверждают зависимость (5).

Подставляя (5) в уравнение (1), для широких речных русел при $R = h_{cp}$ будем иметь:

$$C = 201g \frac{h}{7hi + \frac{0,004}{\sqrt{hi}}}. \quad (12)$$

Формула (12) уже не включает шероховатость и раскрывает вид функции $C = f(hi)$. Подставляя (8) в (2), получаем степенную формулу для коэффициента Шези, не включающую шероховатость:

$$C = 25 \left(\frac{H}{65Hi + \frac{0,025}{\sqrt{Hi}}} \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (13)$$

В частном случае, когда первое слагаемое знаменателя в формулах (12) и (13) значительно больше второго (случай вполне шероховатого трения), будем иметь:

$$C = 20 \lg \frac{1}{7i} = -20 \lg 7i. \quad (14)$$

Из формулы (13) получаем:

$$C = 25 \left(\frac{1}{65i} \right)^{\frac{1}{6}} = \frac{12,5}{i^{\frac{1}{6}}}. \quad (15)$$

Если вместо соотношения $d = 65Ri$ в формуле (14) принять $d = 100Ri$, то коэффициент в формуле (15) будет равен 11,5 вместо 12,5, т.е. изменения множителя при Ri слабо сказываются на величине коэффициента в формуле коэффициента Шези. Таким образом, приходим к заключению, что в конечном счете коэффициент Шези является функцией только уклона русла:

$$C \approx \left(\frac{1}{i} \right)^y \approx \left(\frac{1}{i} \right)^{f(i)} = f(i).$$

Для средней скорости будем иметь:

$$\frac{v}{\sqrt{R}} = C \sqrt{i} = f_2(i).$$

Как известно, показатель степени y изменяется в пределах от 0,5 (очень малые C) до 0,1 (очень большие C) [18]. При $y = 0,5$ для средней скорости получаем:

$$v \approx \sqrt{Ri}.$$

Формула средней скорости для саморегулирующихся потоков при $y = 0,1$ принимает следующий вид:

$$v \approx \sqrt{Ri}^{0,4}.$$

При наиболее распространенном значении $y = 1/6$

$$v \approx \sqrt{R} \cdot \sqrt[3]{i}.$$

Эта же зависимость следует из (15). Следовательно, во всех случаях имеет место пропорциональность средней скорости корню квадратному из гидравлического радиуса.

В частном случае, когда второй член знаменателя в формулах (12) и (13) значительно больше первого (случай гидрав-

лически гладкого трения), будем иметь:

$$C = 20 \lg \frac{h\sqrt{hi}}{0,004} = 20 \lg h\sqrt{hi} + \text{const};$$

$$C = 25 \left(\frac{h\sqrt{hi}}{0,025} \right)^{\frac{1}{6}} = \text{const} \left(h\sqrt{hi} \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (16)$$

Таким образом, в указанном случае коэффициент Шези зависит от параметра $h\sqrt{hi}$, который приближенно может рассматриваться в качестве величины, пропорциональной расходу, приходящемуся на 1 м ширины потока.

Подставляя значение C из (15) и (16) в формулу Шези, получаем выражение для средней скорости в гидравлически гладких и вполне шероховатых руслах соответственно:

$$v = 13h^{0,5}i^{\frac{1}{3}}; \quad v = 2,5h^{0,75}i^{0,583}. \quad (17)$$

Полученные формулы целесообразно сравнить с известными эмпирическими зависимостями для устойчивых саморегулирующихся русел.

Формулы (17) весьма близки к эмпирическим формулам: $v = 8,05h^{0,58}i^{0,3}$ Кхана [19], $v = 4,5h^{0,55}i^{0,26}$ Биндемана [20], $v = h^{0,61}i^{0,25}$ Сренна [21] и $v = 17h^{0,5}i^{0,4}$ Соколовского-Покровского [22].

Как видим, в эмпирических формулах значение показателя степени при глубине находится в пределах от 0,5 до 0,6, а при уклоне – от 0,25 до 0,4.

Проверка формулы (14)

$$C = 20 \lg \frac{1}{7i} = -20 \lg C_1 i = \text{const} - 20 \lg i,$$

выполненная по данным измерений на равнинных реках США с тщательным измерением уклонов, показала, что она правильно отражает связь между коэффициентом Шези и уклоном реки при различном характере самоформирующегося устойчивого русла. Эта формула подходит и для рек, покрытых льдом. Кроме того, проведенное сравнение формулы (14) с опытными данными по реке Ангаре также свидетельствует об их достаточно удовлетворительном совпадении [23, 24].

Выводы

Выполненный анализ показал, что гидравлический уклон при равномерном движении речного потока в самоформирующемся русле влияет на основные гидравлические параметры потока и русла: скорость течения, глубину потока, крупность зерен внутрирусловых грунтов. В таком случае гидравлический уклон

оказывается единственным фактором, определяющим сопротивление русла.

В настоящей статье рассматриваются и развиваются подходы, основанные на материалах, ранее переданных автору профессором, доктором технических наук А. Д. Альтшулем, светлой памяти которого посвящается эта статья.

1. **Альтшуль А. Д.** Основные закономерности движения воды в открытых руслах // Известия АН СССР. – 1950. – №5. – С. 95–99.

2. **Siedeck R.** Zeitshist des Ostereichishen Ing. and Arhitecten Vereins. – Berlin, 1901. – Bd 53.

3. **Germanek.** Zeitshist des Ostereichishen Ing and Arhitecten Vereins. – Berlin, 1905. – Bd 237.

4. **Gessle.** Zeitshist fur Gewasserkunde. – Berlin, 1899. – Bd 2.

5. **Matackiehitch.** Zeitshist fur Gewasserkunde. – Berlin, 1911. – Bd 10.

6. **Lindloe.** Zeitshist fur Gewasserkunde. – Berlin, 1911. – Bd 10.

7. **Groger.** Zeitshist des Ostereichishen Ing. and Arhitecten Vereins. – Berlin, 1913. – Bd 65.

8. **Christen T.** Das Gesets der Transit des Wassers. – Leipzig. – Bd. 7.

9. **Wrukel. Z.** Bauverwaltung. – Berlin, 1923. – Bd. 103–104.

10. **Mises R.** Erfahrung in die technishe Hydromechanik. – Berlin, 1913. – Bd. 14.

11. **Великанов М. А.** Динамика русловых потоков. – М.: Гостехиздат, 1954. – Т.1. – 323 с.

12. **Альтшуль А. Д.** Гидравлические потери на трение в трубопроводах. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 167 с.

13. **Гришин М. М.** К вопросу о классификации горных рек / Сборник трудов МИСИ. – М.: МИСИ, – 1939. – С. 27–35.

14. **Алтуний С.Т.** Вопросы формирования рек у гидроузлов / Труды ТНИМСХ. – 1955. – Вып. 1. – С. 34–39.

15. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. – М.: Иностранная Литература, 1951. – 393 с.

16. **Strickler A.** Beitrdrge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen fur Strцme, Kandle und Geschlossene Leitungen. – Bern, 1923. – № 16.

17. **Студеничников Б. И.** Размывающая способность потока и методы русловых расчетов. – М.: Госстройиздат, 1964. – 184 с.

18. **Мостков М. А.** Гидравлика. – М.: Гострансиздат, 1958. – 345 с.

19. **Евреинов В. Н.** Гидравлика. – М.: Изд-во МРФ СССР, 1947. – 795 с.

20. **Bindemann.** Formeln zur Berechnung d. mittleren Wassergeschwindigkeit. – Leipzig, 1924. – Bd. 9.

21. **Гибсон А.** Гидравлика. – М.: Энергоиздат, 1934. – 602 с.

22. **Лучшева А. А.** Гидрология. – М.: Гидрометеиздат, 1963. – 180 с.

23. **Kolupailo S.** Applied Mechanics Review. – NY, 1962. – Vol. 7. – P. 63–68.

24. **Альтшуль А. Д.** О формуле коэффициента Шези для открытых русел // Гидротехническое строительство. – 1961. – № 7. – С. 18–23.

Материал поступил в редакцию 01.02.11.

Вольнов Михаил Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель директора
Тел. 8 (499) 153-21-33