

С.Д. Винников

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕЧНОЙ ГИДРАВЛИКИ

S.D. Vinnikov

SOME ASPECTS OF RIVER HYDRAULICS

Рассматриваются положения гидравлики потока, исторически принимающиеся неизменными. Например, в гидродинамическом уравнении Сен-Венана во всех слагаемых принимается в расчет одно и то же значение скорости течения потока. Однако при несколько ином подходе к оценке сил, действующих на жидкость в канале (реке), становится очевидным, что эти положения требуют корректировки. Разработана формула для расчета средней скорости течения воды в открытом русле реки при неустановившемся ее движении. Выполнен анализ слагаемых уравнения Сен-Венана и приводятся их количественные значения. А в целом работа посвящена рассмотрению пропускной способности русла при неустановившемся движении речного потока.

Theses of fluvial hydraulics are considered and they are referred to as constant. For example, the same value of current velocity is used in all components of Saint-Venant's hydrodynamical equation. However, using another approach to an estimation of the forces affecting a liquid in the channel, it becomes obvious, that these positions need reconsidering. The formula for calculation of average current for a case of unsteady flow regime in an open channel has been developed. An analysis of components of Saint-Venant hydrodynamical equation has been performed and their quantitative values have been given.

С целью раскрытия рассматриваемых ниже задач речной гидравлики обратимся прежде всего к краткому анализу равномерного движения открытого прямолинейного потока.

1. Академик Н.Н. Павловский для случая равномерного движения воды в безнапорном потоке ввел понятие модуля скорости течения W [Павловский, 1937]

$$W = \frac{V_{\delta}}{i^{1/2}}, \quad (1)$$

где V_{δ} – средняя скорость потока по сечению реки; i – уклон водной поверхности потока при его равномерном движении. При этом понятие это им никак не комментируется. Не находим их и в последующей научной литературе.

Анализ экспериментальных исследований, выполненных, например, А.П. Зегждой [Зегжда, 1957] и другими учеными, приводит нас к тому, что при равномерном движении открытого потока модуль скорости (1) является инвариантом ($W = \text{const}$) – независимым от уклона водной поверхности при фиксированной глубине потока h . Дальнейшие рассуждения показывают, что коэффициент гидравлического сопротивления λ , коэффициент Шези C и коэффициент шероховатости n также постоянные величины (т. е. не зависят от

уклона водной поверхности при $h = \text{const}$) и определяются по следующим выражениям:

$$\lambda = \frac{2gR}{W^2} = \text{const}, \quad C = \frac{W}{R^{1/2}} = \text{const}, \quad n = \frac{R^{2/3}}{W} = \text{const}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; R – гидравлический радиус. Проверить это утверждение можно экспериментом, выполненным в лабораторном лотке с переменным уклоном дна.

Из сказанного выше вытекает, что при равномерном движении потока неправомерно устанавливать связи λ , C и n с уклоном водной поверхности. Однако такие связи приводятся не только в научной, но даже в учебной литературе по гидравлике и гидрометрии. Их автоматически переносят на неустановившиеся потоки. Получают петлеобразные кривые для λ , C и n и пытаются их анализировать. При этом не задумываются над тем, что при развитой турбулентности потока они неизменны и меняются только с наполнением русла.

При неустановившемся движении потока, т. е. при петлеобразной кривой скоростей и расходов (рис. 1), получаем три значения упомянутых коэффициентов для конкретного наполнения русла, средние из которых, соответствующие равномерному движению потока, являются истинными значениями, а крайние – соответствующие кривой подъема и кривой спада уровня воды – ошибочными. Причиной этого является неправомерность применения для их вычисления формулы Шези, в которую подставляются значения уклона, соответствующие фазам подъема и спада уровня воды.

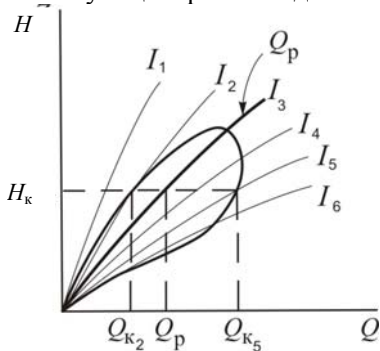


Рис. 1. Петлеобразная кривая расходов воды с изолиниями уклона водной поверхности I_i ($i = 1 - 6$). $Q_{к2}$, $Q_{к5}$, Q_p – расходы воды при глубине потока H_k соответственно при спаде и подъеме уровня воды и при равномерном движении потока.

Отметим также, что некоторые исследователи коэффициент гидравлического сопротивления λ ставят в зависимость от того, ускоренное или замедленное движение потока, т. е. от его ускорения. При этом одни авторы, например [Коваленко, 2006], утверждают, что при ускоренном движении λ уменьшается, а при замедленном – увеличивается, а другие – утверждают обратное [Розовский, 1967]. Эти две точки зрения обсуждаются и в широко известной работе М.С. Грушевского [Грушевский, 1982]. При этом в работе [Коваленко, 2006] нет физического объяснения факта уменьшения трения

в фазе подъема уровня воды. В работе [Розовский, 1967] авторы увеличение λ в фазе подъема уровня воды объясняют перестройкой эпюры скорости и показывают это на примере (проводят эксперимент в лабораторном лотке). При этом они допускают грубую ошибку – замедленное, равномерное и ускоренное движения рассматривают не в одном и том же гидростворе, а соответственно, в трех разных. По существу, они рассматривают разные формы течения. По нашему мнению, такое неоднозначное представление о коэффициенте сопротивления λ проистекает от не вполне четкого представления о действующих силах на поток жидкости при неустановившемся движении.

2. При рассмотрении сил, действующих на открытый поток в гидростворе, устанавливаем, что имеем дело только с двумя силами – силой тяжести, например, в уравнении Сен-Венана, учитываемой через уклон водной поверхности I , и силой трения, также учитываемой через уклон водной поверхности при равномерном движении воды i .

Известно, что сила трения (ее максимальное значение) определяется при равномерном движении потока, которому соответствует равенство уклонов дна и водной поверхности. Этому случаю и отвечает коэффициент λ , характеризующий гидравлическое сопротивление русла в данном сечении.

Если при сравнении названных выше двух сил получаем $\pm \Delta I = (I - i)$, то это означает, что сила тяжести, действующая в гидростворе на воду, либо больше силы трения (этот случай соответствует правой ветви петлеобразной кривой расходов воды), либо меньше силы трения (этот случай соответствует левой ветви петлеобразной кривой расходов воды).

Исследованиями установлено, что сила трения пропорциональна квадрату скорости движения потока, и эта связь для определенного наполнения русла ($h = \text{const}$) описывается зависимостью:

$$\tau = \rho k v_p^2 = \rho g R i, \quad (3)$$

где ρ – плотность воды; k – коэффициент пропорциональности.

Будем считать, что $I > i$, тогда для рассматриваемого створа получим:

$$I - i = dI. \quad (4)$$

С учетом второго закона Ньютона имеем

$$mg \, dI = ma \quad (5)$$

или

$$dI = \frac{a}{g} = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (6)$$

где m – масса жидкости; a – ускорение; α_0 и α – коррективы скорости.

В научной литературе превышение силы тяжести над силой трения в [(5) $F = ma$] называют силой инерции и рассматривают ее как действующую силу.

На самом деле, это кажущаяся сила [Кухлинг, 1985] и что ее в природе не существует хорошо показано, например, в работах Н.В. Гулиа [Гулиа, 1982, 2003]. Она введена в рассмотрение с целью замыкания уравновешенной системы сил (принцип Ж. Д'Аламбера). Выражения в (6) $\alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t}$ и $\alpha v \frac{\partial v}{\partial x}$ принято называть соответственно локальным и конвективным ускорениями.

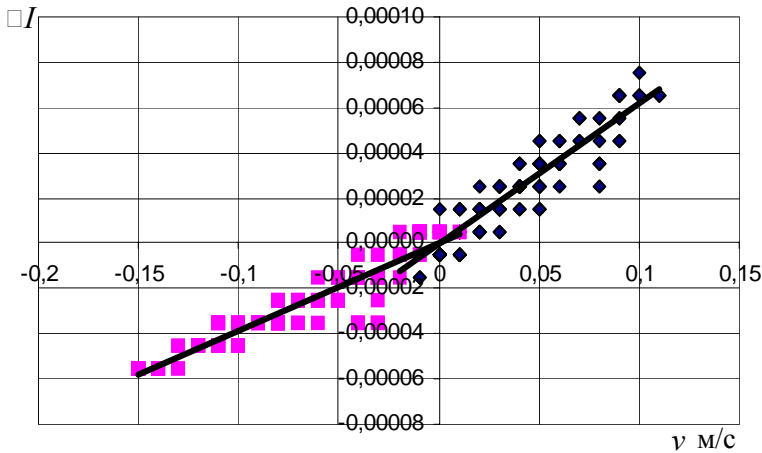


Рис. 2. Связь $\Delta v = f(\Delta I)$ для гидроствора № 4 р. Тверцы.

Таким образом, сила инерции (фиктивная сила) равна той части силы тяжести, действующей в рассматриваемом гидростворе на жидкость, на которую она превышает силу трения (+ ΔI) или меньше силы трения (- ΔI), а с учетом сказанного выше имеем $\Delta v \sim \Delta I$. Такая связь (рис. 2) построена нами по данным натурных наблюдений, выполненных на р. Тверце, при осуществлении попусков из водохранилища [Исследования неустановившего движения..., 1961].

Итак, после совместного решения (3), (4) и (6) найдем

$$I = \frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v_p^2}{C^2 R}. \quad (7)$$

Уравнение (7) аналогично по структуре гидродинамическому уравнению Сен-Венана. Отличается оно от него только третьим слагаемым справа от знака равенства, где вместо скорости v , отражающей течение в данный момент времени, стоит скорость при равномерном движении потока v_p . В этом уравнении первое слагаемое справа характеризует энергию, затраченную на перенос массы воды m с ускорением $\alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t}$, а второе – энергию, затраченную потоком на преодоление сопротивления, обусловленного непараллельностью

поверхности дна и водной поверхности (их сходимостью или расхождением). В фазе подъема уровня воды эти поверхности сходятся, а в фазе спада – расходятся. Первое слагаемое имеет знаки \pm , соответствующие фазам подъема и спада, а второе – знак минус в периоды обеих фаз.

Подытоживая этот раздел, отметим, что в гидродинамическом уравнении Сен-Венана без всякого на то основания в слагаемом, отражающем силу трения, вводят текущую скорость v (а не v_p) по примеру Буссинеско, который это осуществил при преобразовании уравнения Навье – Стокса в уравнение Сен-Венана [Бобылев, 1898].

3. Изложенное выше представление, касающееся сущности слагаемых уравнения Сен-Венана (7), позволяет найти количественное значение этих слагаемых. Покажем это на примере р. Тверцы применительно к гидроствору № 2 [Исследования..., 1961]. При этом долю каждого составляющего уравнения определим в процентах относительно измеренного уклона водной поверхности I в гидростворе.

Для осуществления поставленной задачи нам должна быть известна однозначная кривая скоростей (расходов) и соответствующий ей уклон равномерного движения потока в реке $i = I_3$ (см. рис. 1). Для гидроствора № 2 он равен 0,00016. Воспользуемся более выраженным попуском № 2 (рис. 3).

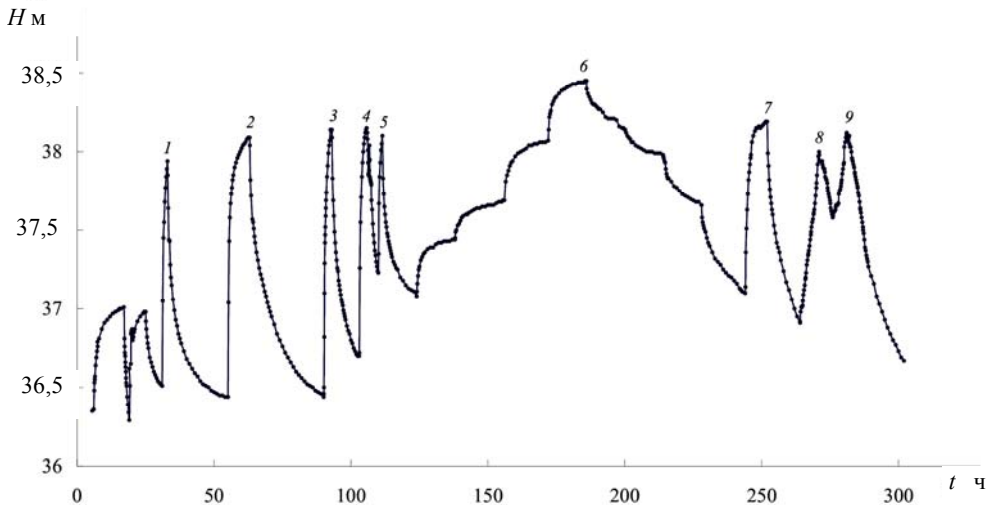


Рис. 3. Ход уровня воды в гидростворе № 2 р. Тверцы.

1 – 9 – номера попусков из водохранилища, — . — – моменты измерения гидравлических характеристик.

Расчеты показали, что количество энергии потока, затраченной им на преодоление сопротивления в гидростворе, вызванное трением о дно реки и формой поперечного сечения ее русла [последнее слагаемое (7)], изменяется

в зависимости от наполнения русла в пределах 15 – 320 – 130 %. Количество же энергии потока, затраченной на преодоление сопротивления, обусловленное непараллельностью поверхностей дна и водного потока (затраченной на деформацию тела в виде волны попуска или паводочной волны – предпоследнее слагаемое), не превышает 13 %, а количество энергии, затраченной на ускоренный или замедленный перенос массы воды (первое слагаемое справа) составляет в фазе подъема уровня воды 80 – 0 %, а в фазе спада 0 – 215 – 30 % (рис. 4). Это значение количества энергии определено по уравнению (7) как остаточный член, а все остальные – по данным натуральных измерений [Исследования..., 1961].

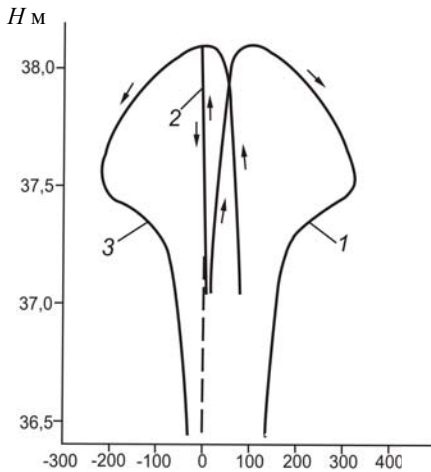


Рис. 4. Изменение энергии потока в гидростворе № 2 р. Тверцы (попуск № 2), обусловленное конвективным (1), локальным (2) ускорениями и гидравлическим трением (3). Подъему уровня воды соответствует стрелка, направленная вверх, спаду уровня стрелка, направленная вниз.

Проанализировав приведенные цифровые значения количества энергий, можно сказать, что в некоторых случаях вторым слагаемым справа уравнения Сен-Венана, отражающим энергию, затраченную на деформацию волны попуска, можно пренебречь.

4. Знание количественного значения слагаемого $\frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$ позволяет нам

определиться с шагом по времени Δt при решении уравнения (7) конечно-разностным способом. Результаты его расчета для попуска № 2 приведены на рис. 5. Из рассмотрения рисунка следует вывод, что $\Delta t \neq \text{const}$ и пропорционально полуширине петли кривой скоростей (расходов), а его значение колеблется от нуля до нескольких минут. При этом обращаем внимание на нашу

трактовку градиента скорости: $\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_p}{\Delta t}$.

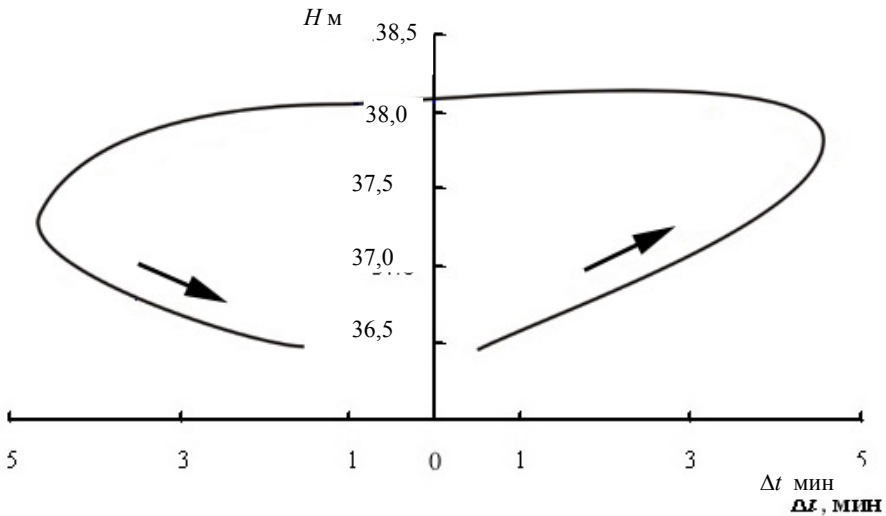


Рис. 5. Изменение шага по времени при прохождении волны попуска, рассчитанного по уравнению Сен-Венана.

Подъему уровня воды соответствует стрелка, направленная вверх, спаду уровня – вниз.

5. Из гидравлики известно, что критерий подобия Фруда Fr выражает отношение конвективной силы инерции к силе тяжести. Как показано выше, конвективная сила инерции является частью силы тяжести. Следовательно, это отношение для открытого потока всегда должно быть меньше единицы, т. е. $Fr < 1$. Однако при оценке состояния потока – спокойный или бурный поток – указывают, что во втором случае $Fr > 1$. По нашему мнению, причиной этой несогласованности является: во-первых, не корректный выбор характерного линейного размера потока – глубины h , а во-вторых, при оценке бурности потока комплекс $\frac{v^2}{gh}$ не следует называть критерием подобия Фруда, по-

тому что он в этом случае таковым не является.

6. Рассмотрим по-прежнему движение воды в прямолинейном канале (реке). Пусть осуществляется по нему серия попусков из водохранилища, а в некотором гидростворе измеряются уровни воды H , средняя скорость течения v и уклон водной поверхности I . Зная площадь поперечного сечения потока, находим и расход воды Q . Будем также считать, что выполнено достаточное количество измерений, чтобы осуществить графические построения и выполнить необходимый анализ гидравлических характеристик.

По измеренным данным в гидростворе канала на графике в координатах (H, Q) для точек, соответствующих расходам Q_i , выпишем значения уклонов водной поверхности I . Затем в поле значений этих уклонов проведем изолинии (см. рис. 1). Значения изолиний уклонов увеличиваются по часовой стрелке.

На этом же графике построим и кривую расходов воды для равномерного движения потока и петлеобразную кривую расходов для одного из упомянутых выше попусков воды.

Эта кривая для Q должна совпасть с изолинией уклона, соответствующей равномерному движению потока, например с изолинией I_3 .

Теперь запишем следующие выражения для отметки уровня воды H_K :

1) для уклонов:

$$\begin{aligned} I_5 &= i + \Delta I_{\text{п}}, \\ I_2 &= i - \Delta I_{\text{с}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где I_5 и I_2 – уклоны, наблюдавшиеся при измерении скорости течения v_{K_5} и v_{K_2} , которым соответствуют расходы воды Q_{K_5} – при подъеме и Q_{K_2} – при спаде уровня воды; $i = I_3$ – уклон при равномерном движении потока со средней скоростью v_p , которой соответствует расход воды Q_p ; $\Delta I_{\text{п}}$ и $\Delta I_{\text{с}}$ – разность между измеренными уклонами I_5 и I_2 и уклоном i ;

2) для скоростей течения:

$$\begin{aligned} v_{K_5} &= v_p + \Delta v_{\text{п}}, \\ v_{K_2} &= v_p - \Delta v_{\text{с}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Delta v_{\text{п}}$ и $\Delta v_{\text{с}}$ – разность между измеренными скоростями v_{K_5} и v_{K_2} и скоростью v_p ;

3) для расходов воды:

$$\begin{aligned} Q_{K_5} &= Q_p + \Delta Q_{\text{п}}, \\ Q_{K_2} &= Q_p - \Delta Q_{\text{с}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta Q_{\text{п}}$ и $\Delta Q_{\text{с}}$ – разность между измеренными расходами воды Q_{K_5} и Q_{K_2} и расходом Q_p .

Если сравним выражения (8) и (9), то придем к выводу, что между Δv и ΔI имеется пропорциональная связь, записанная нами ранее в виде (6). В качестве примера, для подтверждения такой связи, построены графики для гидростворов № 2, 3, 4 р. Тверцы, на которой была осуществлена серия специальных попусков из водохранилища [Исследования..., 1961] (см. рис. 3). Единая связь вида

$$\begin{aligned} \Delta v &= a_{\text{п}} \Delta I, \\ \Delta v &= a_{\text{с}} \Delta I, \end{aligned} \quad (11)$$

где $a_{\text{п}}$ и $a_{\text{с}}$ – коэффициенты, соответствующие фазам подъема и спада уровней воды, имеет место не только для всех наполнений русла реки, но и для всех первых шести попусков (см. рис. 2). Здесь следует отметить, что гидравлические характеристики потока следующих трех попусков (седьмого, восьмого и

девятого) в этом случае не использовались, так как они были привлечены для апробации разработанной нами формулы.

Затем были построены зависимости $a_{n,c} = f(i)$ – между коэффициентами a формулы (11) и уклонами, соответствующими равномерному движению потока i в гидростворах № 2, 3, 4. В результате получили для фазы подъема и спада уровня воды соответственно

$$\begin{aligned} a_n &= \alpha_{1_n} i, \\ a_c &= \alpha_{1_c} i, \end{aligned} \tag{12}$$

где $\alpha_{1_n} = 1,3 \cdot 10^7$ м/с, а $\alpha_{1_c} = 2,3 \cdot 10^7$ м/с.

Конечно, эти значения коэффициентов, зависящие от деформации тела (волны попуска), т. е. от слагаемого $\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}$, требуют еще своего уточнения, так

как подобные исследования выполняются, по-видимому, впервые и к тому же построены они по трем точкам, соответствующим трем гидростворам – № 2, 3, 4. Для этого желательно провести эксперимент в канале, а лучше в гидравлическом лотке с переменным уклоном дна, в котором можно выполнить более точные измерения, чем в натуре. Уместно здесь обратить внимание гидравликов на то, что измерения, подобные описанным выше, были выполнены и на р. Свирь [Исследования..., 1963]. Но к этим измерениям необходимо относиться очень настороженно, так как река на всем исследуемом участке находится в подпоре от Ладожского озера, о чем в указанной работе ничего не говорится.

Таким образом, если для гидроствора реки каким-либо образом установлена однозначная кривая расходов воды и соответствующий ей уклон при равномерном движении потока i , то при известном уклоне водной поверхности I при неустановившемся движении потока при отметке H в гидростворе по формуле (8) найдем разность уклонов ΔI . Затем по значению уклона i и коэффициенту $\alpha_{1_{n,c}}$ определим по формулам (12) коэффициент инерционности потока $a_{n,c}$. А с учетом связи (11) по формуле (9) найдем среднюю скорость движения жидкости в неустановившемся потоке:

$$\begin{aligned} v_n &= v_p + \Delta v_n = C\sqrt{Ri} + a_n \Delta I_n = C\sqrt{Ri} + \alpha_{1_n} i \Delta I_n, \\ v_c &= v_p + \Delta v_c = C\sqrt{Ri} + a_c \Delta I_c = C\sqrt{Ri} + \alpha_{1_c} i \Delta I_c. \end{aligned} \tag{13}$$

Теперь, после установления сущности предлагаемого способа определения средней скорости течения в канале (реке) при неустановившемся движении жидкости, логично записать вместо двух формул (13) одну формулу:

$$v = C\sqrt{Ri} + \alpha_{1_{n,c}} i \Delta I = C\sqrt{Ri} + \alpha_{1_{n,c}} i(I - i). \tag{14}$$

При этом следует иметь в виду, что коэффициент α_1 в (14) принимает два значения в зависимости от того, какой знак имеет разность уклонов Δl : если плюс, то используем $\alpha_{1п}$, если минус, то $\alpha_{1с}$. Значения этих коэффициентов для р. Тверцы приведены выше.

Проверка расчетной формулы (14) по определению средней скорости течения воды в реке при ее неустановившемся движении, как отметили выше, была осуществлена на данных натуральных наблюдений по гидроствору № 4 ($i = 0,000115$) р. Тверцы, попуски № 7 – 9.

В результате установлено, что максимальное отклонение расчетного значения скорости от ее измеренного значения не превышает + 5 и – 9 %. На основании этого можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии результатов расчета скорости по формуле (14) натурным данным.

Таким образом, формула (14) может быть использована в практических целях, например, для экстраполяции петлеобразной кривой расходов воды, если на гидростворе измерены отметка уровня воды и уклон водной поверхности.

Литература

1. Бобылев Д. Очерк теории водных течений, выработанной Буссинеском. – СПб.: Типография Ю. Н. Эрмих, 1898. – 188 с.
2. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 288 с.
3. Гуля Н. В. Инерция. – М.: Наука, 1982. – 178 с.
4. Гуля Н. В. Удивительная физика. – М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2003. – 256 с.
5. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. – Л.-М.: Госстройиздат, 1957. – 276 с.
6. Исследования неустановившегося движения воды в реках Тверца и Оредеж. – Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 288 с.
7. Исследования неустановившегося движения воды на реке Свирь в зимних и летних условиях. – Л.: Гидрометеоздат, 1963. – 252 с.
8. Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
9. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 519 с.
10. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник. – Л. – М.: ОНТИ-НКТП, 1937. – 891 с.
11. Розовский М. Л., Еременко Е. В., Базилевич В. А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. – Киев: Наукова Думка, 1967. – 275 с.