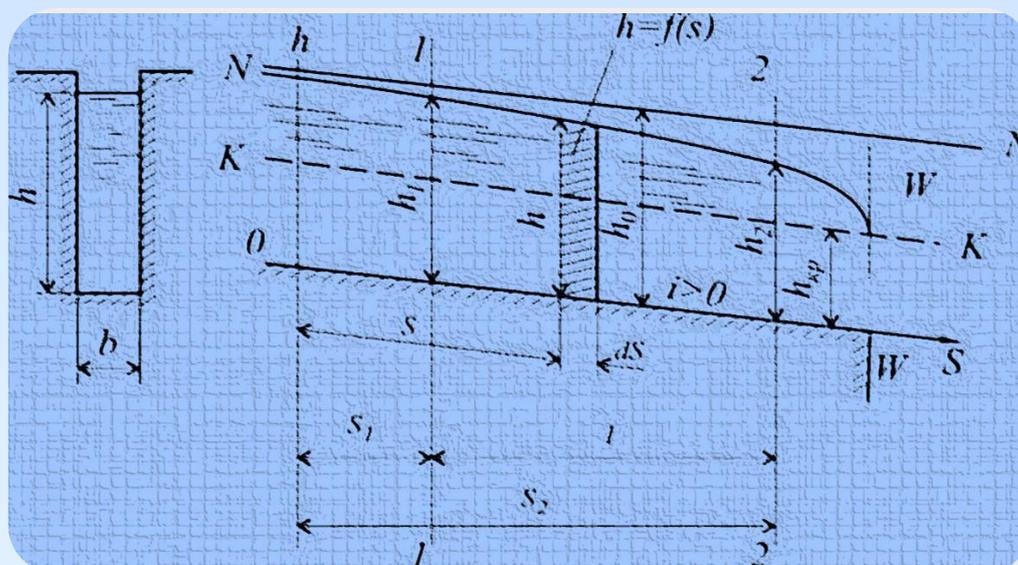


П.А. Михеев, В.А. Храпковский, А.И. Перелыгин,
В.Н. Ширяев

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ВЕСЬМА УЗКИХ РУСЛАХ



Новочеркасск
Лик
2013

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НОЧЕРКАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕЛИОРАТИВНАЯ
АКАДЕМИЯ»

П.А. Михеев, В.А. Храпковский, А.И. Перелыгин, В.Н. Ширяев

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ВЕСЬМА УЗКИХ РУСЛАХ

Новочеркасск
Лик
2013

УДК 556.536:532.54
ББК 26.222.5
Н 54

Рецензент – д-р техн. наук, профессор, заместитель директора
Российского НИИ проблем мелиорации *Косиченко Ю.М.*

Н 54 Михеев, П.А. Неравномерное движение воды в весьма узких руслах /П.А. Михеев, В.А. Храпковский, А.И. Перелыгин, В.Н. Ширяев; Новоч. гос. мелиор. акад. – Новочеркасск, 2013. – 45 с.
ISBN 978-5-9947-0364-9

Рассмотрены особенности движения водного потока в весьма узких руслах, которые используются в оросительных, лесосплавных, рыбоотводящих или ливнеотводящих системах, для подачи или отведения воды, на основе искусственных лотков. Гидравлические условия таких русел имеют свои особенности и закономерности изменения основных параметров потока, знание которых представляет научный и практический интерес.

Гидравлика узких русел является важным направлением научного поиска и обоснования критериев, методик оптимизации технических решений отдельных гидротехнических сооружений или их элементов.

УДК 556.536:532.54
ББК 26.222.5

ISBN 978-5-9947-0364-9

© Новочеркасская государственная
мелиоративная академия, 2013
© Авторы, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии рационального использования водных ресурсов предусматривают применением искусственных лотков как основных элементов водопроводящих систем для подачи или отведения воды, например, в оросительных, лесосплавных, рыбоотводящих или иных целях. Характер движения потока в пределах лотков различного назначения является основным критерием при разработке отдельных конструкций или системы сооружений в целом. Сопоставление и оценка гидравлических схем течения потока для различных компоновок таких лотков позволяет выбрать оптимальный вариант проектного решения с точки зрения создания наиболее благоприятных условий для движения потока в соответствии с назначением сооружения.

Следует отметить, что в зарубежной и отечественной литературе вопросы движения водного потока в условиях узких лотков и каналов изучены недостаточно и связано это, в первую очередь, с тем, что в практике водохозяйственного строительства такие каналы используются достаточно редко. Как правило, такие каналы имеют незначительную протяжённость, в пределах которой изменениями гидравлических параметров потока можно пренебречь.

В то же время движение водного потока в узких руслах лотков имеет свои особенности, а закономерности изменения параметров потока в значительной степени зависят от размеров поперечного сечения и уклона дна, величины абсолютной шероховатости стенок и дна, знание закономерностей которых представляет научный и практический интерес. В этой связи гидравлика узких русел может стать важным направлением научного поиска и обоснования критериев, а также методики оптимизации технических решений отдельных гидротехнических сооружений или их элементов.

В настоящей работе рассматривается неравномерное движение воды в весьма узких призматических руслах прямоугольного поперечного сечения.

Авторы выражают признательность за ценные замечания и советы рецензенту работы доктору технических наук, профессору Косиченко Ю.М.

1. ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ВОДЫ В УЗКИХ РУСЛАХ

Анализ гидравлических условий движения потока воды в пределах лотков различных конструкций позволяет отметить, что геометрические и кинематические параметры потока воды, необходимые для создания оптимальных условий движения, должны отвечать функциональным требованиям сооружения, например, для рыбоотводящих лотков – сохранения жизнеспособности рыб. В большей степени общим требованиям отвечает лоток прямоугольного поперечного сечения с уклоном, обеспечивающим проектную пропускную способность. Вместе с тем, практика показывает, что при соответствующих топографических условиях местности, высотном положении рыбозащитного объекта и бассейна-рыбоприёмника возможны схемы с различными условиями сопряжения дна (горизонтально или с уклоном). Систематизация существующих конструкций рыбоприёмных лотков из отечественной и зарубежной практики позволили выделить основные параметры, при которых ширина лотка значительно меньше его глубины.

В общем случае проводящий лоток представляет собой канал, который, как правило, состоит из двух участков: входного – не значительной длины l_1 , в пределах которого наблюдаются местные потери напора h_j , и собственно канала длиной l_2 с потерями по длине h_l .

При этом, как известно, удельная энергия в спокойном потоке убывает только при уменьшении глубины по течению, а единственно возможной формой свободной поверхности при направленном движении воды является кривая спада [1]. В зависимости от условий сопряжения потоков в выходной части может наблюдаться как подтопленное, так и неподтопленное истечение потока (наиболее характерное для данной схемы на практике), что будет сказываться на параметрах кривой свободной поверхности. В отличие от традиционных каналов, в которых, в зависимости от протяжённости участков, отдельными потерями (местными или по длине) можно пренебречь, лоток, как правило, является

коротким каналом, в котором потери напора на участках, как и их протяжённость, соизмеримы и, следовательно, пренебрегать ими нельзя.

Расчёт коротких каналов (например, быстотоков) при неравномерном движении воды достаточно широко освещён в литературе [2–4]. Как правило, исходными данными являются: проектный расход, размеры поперечного сечения канала и его продольный профиль, коэффициенты шероховатости стенок и дна, отметки уровней воды в верхнем и нижнем бьефах. В результате расчёта неравномерного движения воды в канале строится кривая свободной поверхности воды, определяются глубины и средние скорости в различных его поперечных сечениях.

Однако, в отличие от отмеченных конструкций, рыбоприёмный лоток рыбозащитного сооружения имеет протяжённость порядка $15 b_{po}$, что в реальных условиях при ширине рыбоотвода, равной $b_{po} = 0,3–0,6$ м, соответствует протяжённости порядка 4,0–10,0 м, и является сверхкоротким каналом. Глубина воды в рыбоприёмном лотке значительно (в 4 – 8 и более раз) превышает ширину, т.е. по определению Р.Р. Чугаева это весьма узкие русла [5]. Например, в лотке-рыбоприёмнике рыбозащитного сооружения Донского магистрального канала при длине 4,25 м и ширине 0,35 м глубина потока на подходе составляет около 6,0 м, т.е. глубина потока значительно, более чем в 17 раз, превышает ширину лотка. Следует отметить, что в практике гидротехнического строительства подобные русла встречаются редко, чем и объясняется слабая изученность основных закономерностей движения потока в них.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка методики расчёта весьма узких призматических прямоугольных русел, в частности, расчёта кривой свободной поверхности воды при неравномерном движении и заданных параметрах рыбоотводящего потока.

Для достижения поставленной цели необходимо решить одну из основных задач, а именно, установить количественные параметры элементов живого сечения потока, которые характеризуют изучаемые прямоугольные русла, как «весьма узкие».

2. ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖИВОГО СЕЧЕНИЯ ПОТОКА В ВЕСЬМА УЗКИХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

Необходимость рассмотрения особенностей гидравлических элементов живого сечения весьма узких русел вызвана тем, что в литературе отсутствуют количественные значения параметров, их характеризующие. В этой связи воспользуемся принципом аналогии и обратимся к анализу общепринятых в специальной литературе [5–13] понятий «широкие русла» или «весьма широкие русла».

Широкими принято считать русла, в которых ширина значительно больше глубины потока, то есть $B \gg h$, при этом смоченный периметр принимается равным ширине русла $\chi \approx B$, а гидравлический радиус – приблизительно равным глубине. Действительно, рассмотрев предел изменения гидравлического радиуса при возрастании ширины русла, убеждаемся

$$R = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{Bh}{B + 2h} = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{h}{1 + \frac{2h}{B}} = h, \text{ т.е. } R \approx h. \quad (1)$$

Вместе с тем, в количественной оценке соотношения B и h , как основного показателя для широкого русла, в литературных источниках имеются данные, которые значительно разнятся.

Так, исследуя связь локальных гидравлических радиусов $R' = \frac{d\omega}{d\chi}$ с глубиной h в прямоугольных руслах, Л.А. Тепакс [13] получил, что при $\frac{B}{h} > 5$ локальный гидравлический радиус может быть принят равным глубине потока. А в работе Ю.А. Ибад-заде [8] рассматриваются речные русла в диапазоне соотношений $\frac{B}{h} > 8,4$.

Для оценки широких русел И.Ф. Карасёв [9, 10] в своих исследованиях использует понятие относительного смоченного периметра, равного $\tilde{\chi} = \frac{\chi}{R} > 30$.

Проведя несложные преобразования, получаем, что широкое русло по Карасёву характеризуется значением $\frac{B}{h} > 26$.

Очевидно, что критерием количественной оценки, принимаемого для широких русел отношения $\frac{B}{h}$ и допущения $R \approx h$ или $\frac{R}{h} \approx 1$, является ошибка в

определении гидравлического радиуса в сравнении с формулой $R = \frac{Bh}{B + 2h}$. Для

оценки величины этой ошибки установим закономерность изменения функции

$R = f\left(\frac{B}{h}\right)$, представив её в виде графика, на котором по оси абсцисс отклады-

ваются значения $\frac{B}{h}$, а по оси ординат – R в долях от h (рисунок 1).

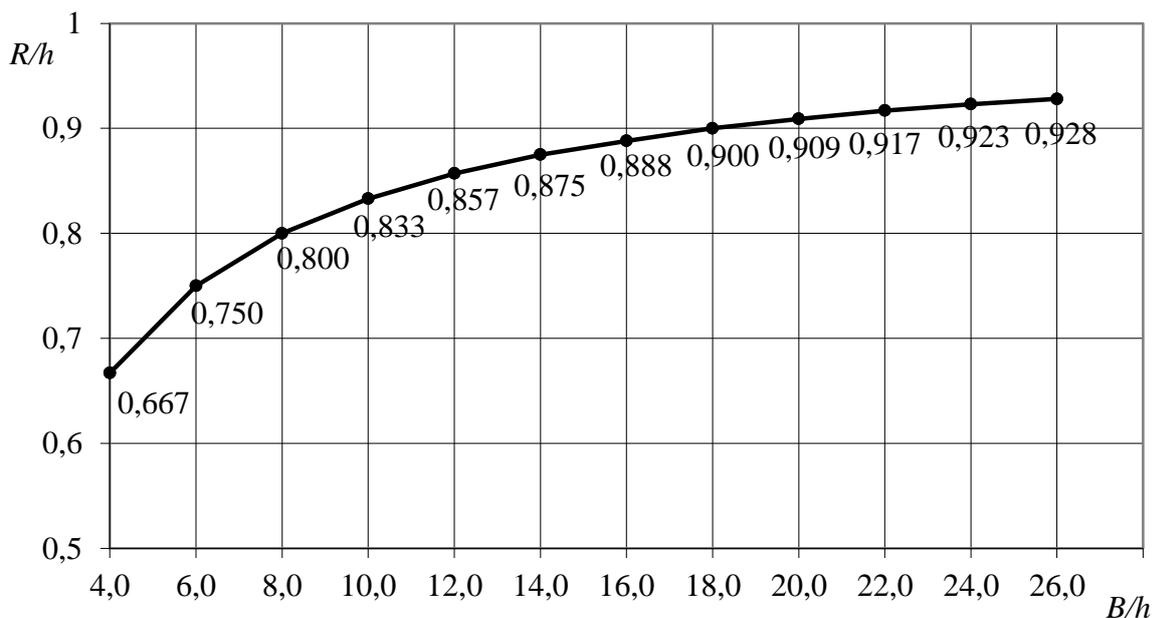


Рисунок 1 – Зависимость $\frac{R}{h} = f\left(\frac{B}{h}\right)$ для широких русел

Из рисунка видно, что при значении $\frac{B}{h} = 26$ (по Карасёву) относительная погрешность в определении гидравлического радиуса составляет 7,2 %, в то время как при $\frac{B}{h} = 5$ (по Тепаксу) погрешность – 28,6 %, что нельзя признать

допустимым.

В то же время проведённый анализ (см. рисунок 1) позволяет сделать вывод о том, что для расчёта весьма широких русел с приемлемой для практических результатов точностью (ошибка менее 10 %) смоченный периметр, равный ширине русла $\chi \approx B$, может приниматься при $B > 20h$.

Рассуждая аналогичным образом, рассмотрим предел изменения гидравлического радиуса при возрастании глубины $h \gg B$ для условий весьма узких русел

$$R = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{Bh}{B + 2h} = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{B}{\frac{B}{h} + 2} = \frac{B}{2} \text{ или } \frac{R}{B} = 0,5. \quad (2)$$

На рисунке 2 показаны закономерности изменения гидравлического радиуса, как функции $\frac{R}{B} = f\left(\frac{h}{B}\right)$ в виде графических зависимостей, полученных

для обычных русел с $\chi = B + 2h$ и весьма узких русел с $\frac{R}{B} = 0,5$.

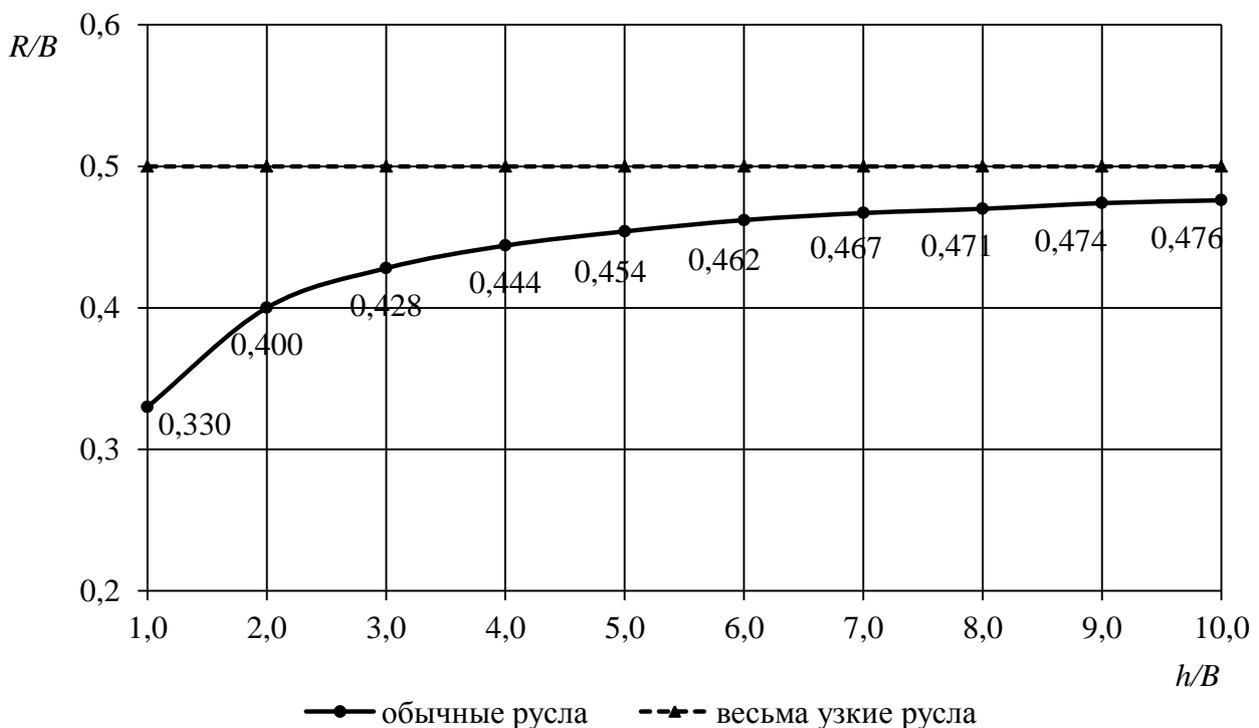


Рисунок 2 – Зависимость $R = f\left(\frac{h}{B}\right)$ для весьма узких русел

Из сопоставления кривых, приведённого графика не трудно убедиться, что относительное расхождение (ошибка) в значениях $\frac{R}{B}$ для весьма узких и обычных русел находится в пределах 10% при значениях $\frac{h}{B} > 4,5 \div 5,0$, а это позволяет сделать вывод о том, что весьма узкими можно признать русла, у которых $h > (4,5-5,0)B$ или $\frac{B}{h} < 0,20 \div 0,22$, а смоченный периметр и гидравлический радиус с приемлемой точностью (с ошибкой до 10 %) можно определять как $\chi \approx 2h$, $R = \frac{B}{2}$.

Одной из основных задач, решаемых при расчёте весьма узких русел, является оценка их пропускной способности. В этой связи проведём оценку погрешности определения расходов воды в весьма узких руслах (при принятом допущении $\chi \approx 2h$ или $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{B}{2}$) в сравнении с расходами в обычных руслах. При оценке пропускной способности русел будем считать одинаковыми площади живых сечений $\omega_{уз} = \omega_{об}$, коэффициенты шероховатости и уклоны дна.

Допущения, принятые для весьма узких русел, приводят к тому, что, в сравнении с обычным руслом, у которого смоченный периметр $\chi = B + 2h$, гидравлический радиус $R = \frac{\omega}{\chi}$ и коэффициент Шези $C = \frac{1}{n} R^y$, а, следовательно, и расход воды должны увеличиться. Меру этого увеличения обозначим коэффициентом $\delta_Q > 1$. Тогда

$$Q_{уз} = \delta_Q Q_{об}, \quad (3)$$

где $Q_{уз}$ и $Q_{об}$ – расход воды, соответственно весьма узкого и обычного русла.

Для определения коэффициента δ_Q используем формулу Шези. Проведя сокращение, получим

$$\delta_Q = \frac{Q_{уз}}{Q_{об}} = \frac{\phi_{уз} C_{уз} \sqrt{R_{уз} l_0}}{\phi_{об} C_{об} \sqrt{R_{об} l_0}} = \frac{C_{уз} \sqrt{R_{уз}}}{C_{об} \sqrt{R_{об}}}. \quad (4)$$

Выразив коэффициент Шези по формуле Маннинга, и проведя преобразования, получим

$$\delta_Q = \frac{\frac{1}{\eta} R_{yз}^{1/6} \sqrt{R_{yз}}}{\frac{1}{\eta} R_{об}^{1/6} \sqrt{R_{об}}} = \left(\frac{R_{yз}}{R_{об}} \right)^{2/3} = \left(\frac{\frac{\phi}{\chi_{yз}}}{\frac{\phi}{\chi_{об}}} \right)^{2/3} = \left(\frac{\chi_{об}}{\chi_{yз}} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

Подставив в (5) соответственно $\chi_{об} = B + 2h$ и $\chi_{yз} = 2h$ получим

$$\delta_Q = \left(\frac{B + 2h}{2h} \right)^{2/3} = \left(\frac{B}{2h} + 1 \right)^{2/3}. \quad (6)$$

Преобразуем (6) относительно $\frac{h}{B}$, получим

$$\frac{h}{B} = \frac{1}{2(\delta_Q^{3/2} - 1)}. \quad (7)$$

Относительная ошибка в определении расхода весьма узкого русла, в котором смоченный периметр принят равным $\chi \approx 2h$, определяется как

$$\Delta Q = \frac{Q_{yз} - Q_{об}}{Q_{об}} \cdot 100\% = (\delta_Q - 1) \cdot 100\%, \quad (8)$$

откуда
$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{100} + 1. \quad (9)$$

После подстановки (9) в (7) получим зависимости, связывающие относительную ширину русла и относительную ошибку в определении расхода

$$\frac{h}{B} = \frac{1}{2 \left[\sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{100} + 1 \right)^3} - 1 \right]} \quad (10)$$

и
$$\Delta Q = \left[\sqrt[3]{\left(1 + \frac{1}{2 \frac{h}{B}} \right)^2} - 1 \right] \cdot 100\%. \quad (11)$$

Задаваясь относительной ошибкой ΔQ % в определении расхода, по формуле (10) можно определить необходимую относительную глубину русла $\frac{h}{B}$,

или, зная $\frac{h}{B}$, по формуле (11) можно определить относительную ошибку в расходе, выраженную в процентах.

Используя данные расчёта гидравлического радиуса (см. рисунок 2) для условий обычных и весьма узких русел, рассчитаем относительную ошибку при определении гидравлического радиуса по формуле

$$\Delta R = \frac{R_{уз} - R_{об}}{R_{об}} \cdot 100\% \quad (12)$$

На рисунке 3 приведены закономерности изменения относительной ошибки при определении расхода воды и гидравлического радиуса для прямоугольных призматических весьма узких русел в зависимости от глубины потока, отнесённой к ширине русла.

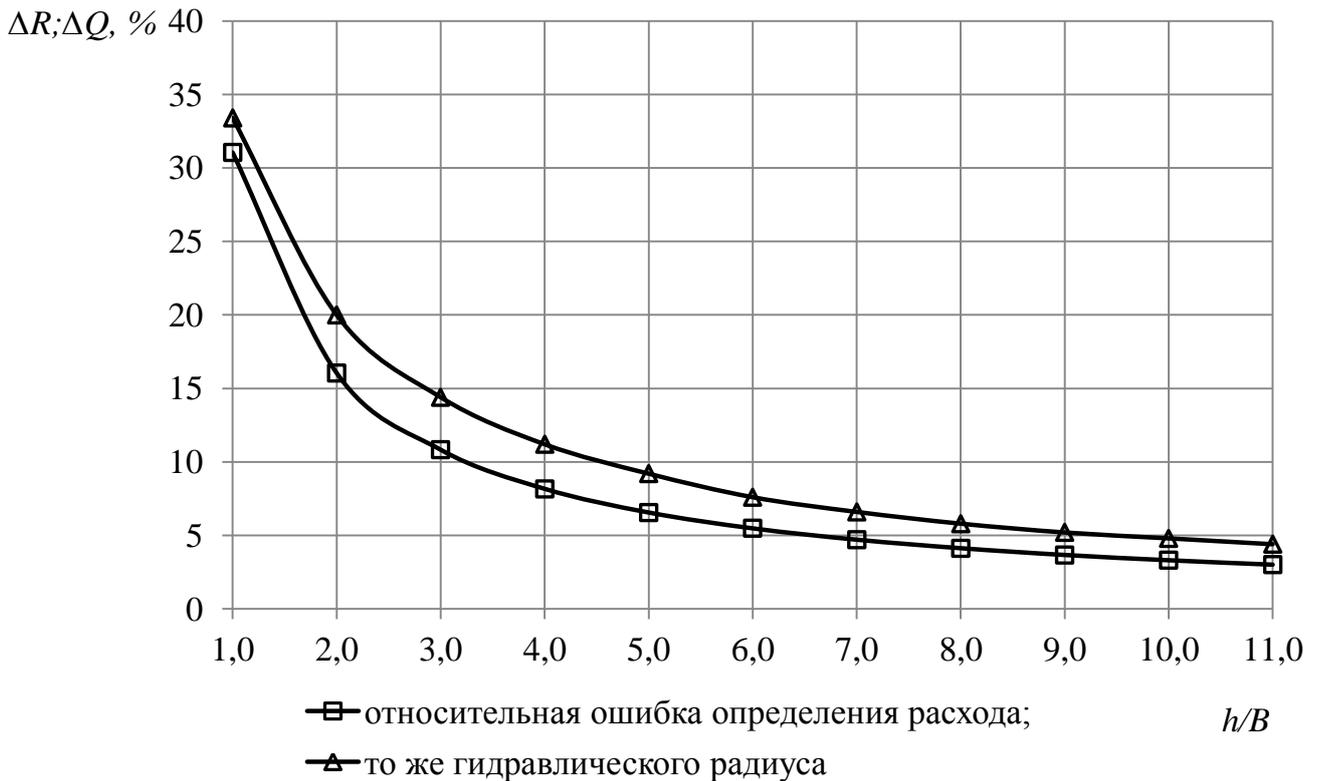


Рисунок 3 – Изменение относительных ошибок в определении расхода и гидравлического радиуса для прямоугольных весьма узких русел в зависимости от h/B

Из рисунка видно, что с приемлемой для практических расчётов погрешностью в определении расхода (до 8,0 %), в определении гидравлического радиуса (до 11,0 %) к весьма узким могут быть отнесены русла, в которых глубина потока в четыре раза больше ширины русла $h > 4B$.

Сравнение относительных ошибок в определении гидравлического радиуса и расхода (см. рисунок 3) для весьма узких русел (при условии $\chi \approx 2h$, $R = 0,5B$) показывает, что ошибка в определении расхода в среднем в 1,4 раза меньше.

Таким образом, обобщая результаты выполненного анализа, можно сделать следующее заключение:

– при расчёте элементов живых сечений ω , R , χ и гидравлических характеристик потока воды в прямоугольных призматических весьма узких руслах при значениях $h \gg B$ с приемлемой для практических расчётов точностью допустимо принимать $\chi \approx 2h$, $R = 0,5B$;

– весьма узкими руслами следует считать (с погрешностью в определении расхода до 8 %) русла, в которых глубина потока превышает ширину русла более чем в четыре раза ($h > 4B$).

3. ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВЕСЬМА УЗКОГО РУСЛА С ОБРАТНЫМ УКЛОНОМ ДНА ($i < 0$)

Для оценки гидравлических условий движения потока в прямоугольном весьма узком русле приняты следующие допущения:

– смоченный периметр не зависит от ширины русла $\chi = 2h$;

– гидравлический радиус не зависит от глубины потока $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{b}{2}$ и явля-

ется величиной постоянной на всем участке движения потока;

– коэффициент Шези $C = f(n, R)$ зависит от коэффициента шероховатости стенок русла, гидравлического радиуса, и не зависит от глубины потока [14].

Прежде чем рассматривать дифференциальное уравнение неравномерного движения в русле рыбоотводящего лотка, остановимся на вопросе о форме свободной поверхности потока. Исходя из условий работы рыбоотводящего лотка, в котором при любых конструктивных схемах скорость потока должна увеличиваться по его длине, наиболее приемлемой формой свободной поверхности является кривая спада типа b^1 . Исходя из этого, в дальнейшем рассматривается условие

$$h_0^1 > h > h_{кр}, \quad (13)$$

где h_0^1 – фиктивная нормальная глубина равномерного движения в предполо-

жении, что уклон дна русла прямой, $i > 0$;

h – глубина воды в живых сечениях при неравномерном движении;

$h_{кр}$ – критическая глубина.

В соответствии расчётной схемой, приведённой на рисунке 4, дифференциальное уравнение неравномерного движения потока для случая прямоугольного призматического русла с обратным уклоном $i < 0$ имеет вид [5].

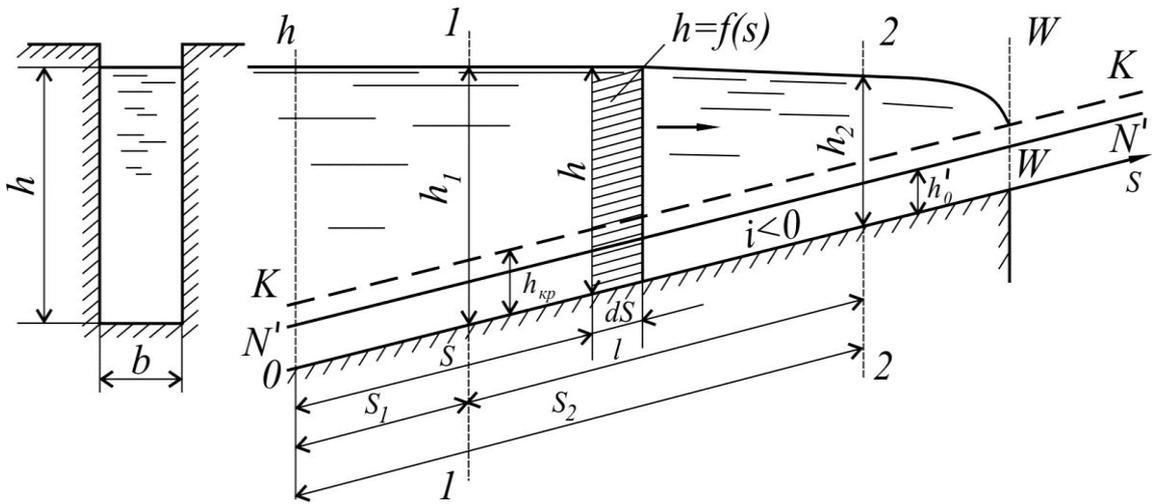


Рисунок 4 – Схема к интегрированию уравнения неравномерного движения воды в призматических руслах с обратным уклоном дна $i < 0$

$$\frac{dh}{ds} = - \frac{i' + \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}, \quad (14)$$

где $i' = |i|$ – уклон дна (абсолютная величина);

Q – расход потока;

$\omega = b \cdot h$ – площадь живого сечения, принимая $B = b$.

По общепринятой в гидравлике методике проведём преобразование числителя правой части уравнения (14)

$$c = i' + \frac{\omega_0^2 \cdot C_0^2 \cdot R_0 \cdot i'}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R} = i' \cdot \left[1 + \frac{b^2 \cdot h_0'^2 \cdot C_0^2 \cdot R_0}{b^2 \cdot h^2 \cdot C^2 \cdot R} \right].$$

После сокращения, с учётом того, что $R = R_0 = const$; $C = C_0 = const$, а h_0' – нормальная глубина равномерного движения при заданном расходе в предположении, что русло имеет положительный уклон, численно равный фактическому отрицательному уклону, получим

$$c = i' \cdot \left[1 + \frac{h_0'^2}{h^2} \right] = i' \cdot \left[1 + \frac{1}{\eta^2} \right] = i' \frac{(\eta^2 + 1)}{\eta^2}, \quad (15)$$

где $\eta = \frac{h}{h_0'}$ – относительная глубина.

Преобразуем знаменатель правой части уравнения (14)

$$z = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3} = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g b^2} \cdot \frac{b}{b \cdot h^3} = 1 - \left(\frac{h_{кр}}{h} \right)^3, \quad (16)$$

где $h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}}$ – критическая глубина потока.

Учитывая, что $h = h'_0 \eta$ и введя обозначение $D = \left(\frac{h_{кр}}{h'_0} \right)^3$, получим

$$z = \frac{\eta^3 - D}{\eta^3}. \quad (17)$$

Подставив (15) и (17) в (14) и проведя преобразования, получим

$$\frac{dh}{ds} = -i' \frac{\frac{\eta^2 + 1}{\eta^2}}{\frac{\eta^3 - D}{\eta^3}} = -i' \frac{(\eta^2 + 1) \cdot \eta}{\eta^3 - D} = -i' \frac{\eta^3 + \eta}{\eta^3 - D}. \quad (18)$$

После подстановки $dh = h'_0 d\eta$ в (18), раздела переменных и проведя преобразования, получим

$$-\frac{i' ds}{h'_0} = \frac{\eta^3 - D}{\eta^3 + \eta} d\eta = \frac{(\eta^3 + \eta) - \eta - D}{\eta^3 + \eta} d\eta = d\eta - \frac{D}{\eta^3 + \eta} d\eta - \frac{1}{\eta^2 + 1} d\eta. \quad (19)$$

Интегрирование (19) производится от сечения 1–1 до сечения 2–2, расположенных на расстоянии l друг от друга по течению, с глубинами h_1 и h_2 , относительными глубинами $\eta_1 = \frac{h_1}{h'_0}$ и $\eta_2 = \frac{h_2}{h'_0}$ (см. рис. 4),

$$\int_0^l -\frac{i' ds}{h'_0} = \int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta - \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{D}{\eta^3 + \eta} d\eta - \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{1 + \eta^2} d\eta. \quad (20)$$

После интегрирования и преобразования окончательно получим

$$\frac{i'l}{h'_0} = -(\eta_2 - \eta_1) + D \ln \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_1^2 + 1}}{\eta_1 \sqrt{\eta_2^2 + 1}} + \arctg \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 + \eta_2 \eta_1}. \quad (21)$$

Уравнение (21) является уравнением неравномерного движения воды для весьма узких прямоугольных русел с обратным уклоном дна. Следует отметить, что в правой части уравнений (21) значения \arctg вычисляется в радианах.

где h_0 – нормальная глубина;

$\eta = \frac{h}{h_0}$ – относительная глубина.

Преобразуем знаменатель правой части уравнения (22)

$$z = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{gb^2} \cdot \frac{b}{b \cdot h^3} = 1 - \left(\frac{h_{кр}}{h} \right)^3 = 1 - \left(\frac{h_{кр}}{h_0 \eta} \right)^3 = 1 - \frac{D}{\eta^3} = \frac{\eta^3 - D}{\eta^3}, \quad (24)$$

где $D = \left(\frac{h_{кр}}{h_0} \right)^3$.

Подставив (23) и (24) в (22) и проведя преобразования, получим

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i \left(\frac{\eta^2 - 1}{\eta^2} \right)}{\frac{\eta^3 - D}{\eta^3}} = \frac{i(\eta^2 - 1) \cdot \eta^3}{\eta^2(\eta^3 - D)} = i \frac{(\eta^2 - 1)\eta}{\eta^3 - D}. \quad (25)$$

Подставив в (25) $dh = h_0 d\eta$ и разделив переменные, получим

$$\frac{id s}{h_0} = \frac{(\eta^3 - \eta) + \eta - D}{\eta^3 - \eta} d\eta = d\eta + \frac{1}{\eta^2 - 1} d\eta - \frac{D}{\eta^3 - \eta} d\eta. \quad (26)$$

Интегрирование (26) производится на участке протяжённостью l между сечениями 1–1 и 2–2 с глубинами, соответственно, h_1 и h_2 и относительными

глубинами $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$ и $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$ (см. рисунок 5),

$$\int_0^l \frac{id s}{h_0} = \int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta + \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{1}{\eta^2 - 1} d\eta - \int_{\eta_1}^{\eta_2} \frac{D}{\eta^3 - \eta} d\eta. \quad (27)$$

После интегрирования и преобразования окончательно, получим

$$\frac{il}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 + D \ln \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_2^2 + 1}}{\eta_1 \sqrt{\eta_1^2 + 1}} + \arctg \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 + \eta_2 \eta_1}. \quad (28)$$

Таким образом, (28) является уравнением неравномерного движения воды для весьма узких прямоугольных русел с прямым уклоном дна $i > 0$.

5. ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ
 ДЛЯ УСЛОВИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВЕСЬМА УЗКОГО РУСЛА
 С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ДНОМ ($I = 0$)

В соответствии с [5] дифференциальное уравнение неравномерного движения для случая прямоугольного призматического русла с горизонтальным дном $i = 0$ (рисунок 6) имеет вид

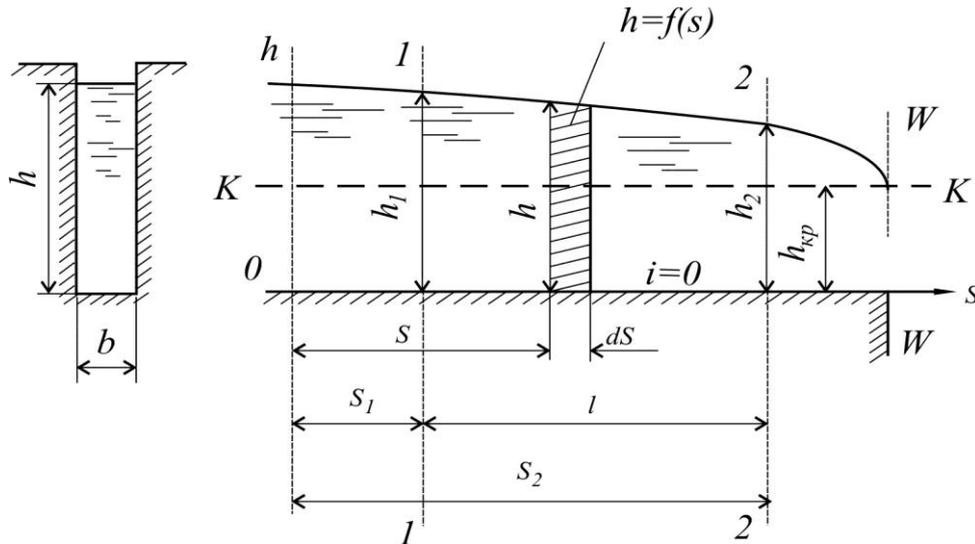


Рисунок 6 – Расчётная схема к интегрированию уравнения неравномерного движения воды в призматических руслах с горизонтальным дном $i = 0$

$$\frac{dh}{ds} = - \frac{\frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (29)$$

Проведём преобразование числителя правой части уравнения (29), выразив расход по формуле Шези для критического уклона русла $Q = \omega_{кр} C_{кр} \sqrt{R_{кр} i_{кр}}$.

С учётом того, что для условий весьма узких русел $R = R_{кр} = const$ и $C = C_{кр} = const$, получим

$$\eta = \frac{\omega_{кр}^2 \cdot C_{кр}^2 \cdot R_{кр} \cdot i_{кр}}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R} = i_{кр} \cdot \frac{b^2 h_{кр}^2}{b^2 h^2} = i_{кр} \frac{1}{\eta_{кр}^2}, \quad (30)$$

где $i_{кр} = \frac{g}{\alpha C_{кр}^2} \frac{h_{кр}}{R_{кр}}$ – критический уклон;

$\eta_{кр} = \frac{h}{h_{кр}}$ – относительная глубина.

Преобразуем знаменатель правой части уравнения (29)

$$z = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{gb^2} \cdot \frac{b}{b \cdot h^3} = 1 - \left(\frac{h_{кр}}{h} \right)^3 = 1 - \frac{1}{\eta_{кр}^3}, \quad (31)$$

Подставив (30) и (31) в (29) и проведя преобразования, получим

$$\frac{dh}{ds} = - \frac{i_{кр} \frac{1}{\eta_{кр}^2}}{1 - \frac{1}{\eta_{кр}^3}} = -i_{кр} \frac{\eta_{кр}^3}{\eta_{кр}^2(\eta_{кр}^3 - 1)} = -i_{кр} \frac{\eta_{кр}}{\eta_{кр}^3 - 1}. \quad (32)$$

Подставив $dh = h_{кр} d\eta_{кр}$ в (32), разделив переменные и проведя преобразования, получим

$$\frac{i_{кр} ds}{h_{кр}} = \left(\frac{1}{\eta_{кр}} - \eta_{кр}^2 \right) d\eta_{кр}. \quad (33)$$

Интегрирование (33) производится на участке длиной l между сечениями 1–1 и 2–2 с глубинами, соответственно, h_1 и h_2 и относительными глубинами

$$\eta_{кр1} = \frac{h_1}{h_{кр}} \text{ и } \eta_{кр2} = \frac{h_2}{h_{кр}} \text{ (см. рисунок б),}$$

$$\int_0^l \frac{i_{кр} ds}{h_{кр}} = \int_{\eta_{кр1}}^{\eta_{кр2}} \frac{1}{\eta_{кр}} d\eta_{кр} - \int_{\eta_{кр1}}^{\eta_{кр2}} \eta_{кр}^2 d\eta_{кр}. \quad (34)$$

После интегрирования и преобразования (34) окончательно получим

$$\frac{i_{кр} l}{h_{кр}} = \ln \frac{\eta_{кр2}}{\eta_{кр1}} + \frac{\eta_{кр1}^3 - \eta_{кр2}^3}{3}. \quad (35)$$

Уравнение (35) является уравнением неравномерного движения воды для весьма узких прямоугольных русел с горизонтальным дном.

Расчёт кривых свободной поверхности при неравномерном движении воды в весьма узких руслах по уравнениям (21), (28) и (35) выполняется по участкам в соответствии с методикой, принятой в гидравлике [1–5].

6. СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТОВ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В
 ВЕСЬМА УЗКИХ РУСЛАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ
 РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Исходным для решения задачи расчёта неравномерного движения воды всеми известными способами является уравнение Бернулли, записанное для двух сечений, расположенных на бесконечно малом расстоянии. Из уравнения Бернулли, например, при $i > 0$ получаем дифференциальное уравнение движения воды в призматических руслах [5]

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \frac{1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2}{1 - j \left(\frac{K_0}{K}\right)^2}, \quad (36)$$

где $K_0 = \omega_0 C_0 \sqrt{R_0}$ и $K = \omega C \sqrt{R}$ – модули расхода, отвечающие соответственно нормальной глубине h_0 и глубине h ;

$$j = \frac{\alpha i C^2 B}{g \chi} - \text{параметр (обозначение)}.$$

Расчёт кривых свободной поверхности при неравномерном движении может быть выполнен с использованием уравнения (36) методом графического интегрирования [15, 16] или методом непосредственного интегрирования. Третий способ расчёта, используемый для любых (призматических и непризматических) русел, основан на применении к расчётным участкам уравнения Бернулли и его численном интегрировании по длине. Метод графического интегрирования, несмотря на кажущуюся простоту, при практическом применении к реальным задачам может оказаться очень сложным [15].

После введения в уравнение (36) относительного модуля расхода, равного $\kappa = \frac{K}{K_0}$, и преобразования получим

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \frac{\kappa^2 - 1}{\kappa^2 - j}. \quad (37)$$

Интегрируя выражение (37) между сечениями 1-1 и 2-2 с глубинами h_1 и h_2 , расстояние между которыми l , получим

$$i_0 \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{\kappa^2 - j}{\kappa^2 - 1} dh = \int_1^2 dh - \int_1^2 \frac{1 - j}{1 - \kappa^2} dh, \quad (38)$$

$$i_0 l = h_2 - h_1 - \int_1^2 \frac{1 - j}{1 - \kappa^2} dh. \quad (39)$$

Под знаком интеграла в правой части выражения (39) входят три переменных величины h , j , κ , которые связаны между собой зависимостями, не позволяющими выразить подынтегральную функцию через одну переменную h в форме, удобной для интегрирования.

В общем случае эта задача может быть решена лишь приближённо. Существует много различных способов нахождения неопределённого интеграла и способов построения кривых свободной поверхности. Краткая характеристика методов интегрирования и способов расчёта плавно изменяющегося движения воды, предложенных разными авторами, начиная от Дюпюи (1848 г.) до Кайфер-Чу (1954 г.), дана в работе В.Т. Чоу [15]. В дополнение к способам, приведённым в этой работе, следует назвать способы расчёта неравномерного движения воды Н.Н. Павловского, И.И. Агроскина, М.М. Скиба, получившие широкую известность.

Отметим, что при разработке всех способов их авторами принимались некоторые допущения, например, форма и размеры поперечного сечения, гидравлический показатель русла $x = const$, величина $j = const$, коэффициент Шези $C = const$, осреднение величин, которые позволяли привести дифференциальное уравнение к виду, поддающемуся непосредственному интегрированию.

Наиболее общим способом расчёта неравномерного движения воды для большинства русел «правильного» поперечного сечения, встречающихся на практике, по Р.Р. Чугаеву [5] следует считать способ Б.А. Бахметева (1912-1915 гг.) [17].

Способ Бахметева основан на использовании показательной зависимости

для модулей расхода в виде

$$\left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^x, \quad (40)$$

где x – постоянная для данного поперечного сечения величина, не зависящая от величины глубин h_1 и h_2 , названная по предложению Н.Н. Павловского гидравлическим показателем русла.

В действительности отношение $\frac{K_1}{K_2}$ представляет собой достаточно

сложную зависимость от h , поскольку $K = \omega C \sqrt{R}$. Показательная зависимость Б.А. Бахметева не имеет строго теоретического обоснования, но с достаточной для практики точностью подтверждается для русел правильной формы при изменении глубин h_1 и h_2 в известных пределах. Для некоторых русел показательная зависимость является теоретически точной. К таким относятся бесконечно узкие прямоугольные русла ($x = 2,0$), бесконечно широкие ($x = 3,4$), треугольные ($x = 5,4$). Для трапецеидальных, прямоугольных русел (исключая бесконечно широкие и узкие) и других зависимость (40) может быть применена с некоторым приближением. Для таких русел гидравлический показатель русла по рекомендации М.Д. Чертоусова [5, 16] определяется по формуле

$$x = 2 \frac{\lg K_{cp} - \lg K_0}{\lg h_{cp} - \lg h_0} \quad (41)$$

где h_{cp} и K_{cp} – средняя глубина и модуль расхода на участке.

Для прямоугольных русел по Р.Р. Чугаеву

$$x = 3,4 - \frac{2,8}{\frac{b}{h_{cp}} + 2}. \quad (42)$$

Показательная зависимость Б.А. Бахметева для модуля расхода позволила преобразовать дифференциальное уравнение неравномерного движения воды в призматических руслах с прямым уклоном дна $i_o > 0$ к виду, удобному для интегрирования [5],

$$\frac{i_0}{h_0} \int_1^2 ds = \int_1^2 d\eta - \int_1^2 \frac{1-j}{1-\eta^x} d\eta. \quad (43)$$

При интегрировании (43) от сечения 1-1 до сечения 2-2 с глубинами h_1 и h_2 , относительными глубинами $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$, $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$, Бахметев принимает второе допущение $j = \bar{j} = const$ на участке, приравнивая эту величину её среднему значению для рассматриваемой задачи. При условии, что гидравлический показатель русла x является величиной известной и постоянной, подынтегральная функция в уравнении зависит только от η , поэтому после интегрирования расчётное уравнение в окончательном виде можно получить

$$\frac{i_0 l}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)], \quad (44)$$

где $\varphi(\eta) = \int \frac{1}{1-\eta^x} d\eta$ – функции Б.А. Бахметева, зависящие от η и x , которые

определяются по таблицам, составленным под руководством Н.Н. Павловского для значений η от 0 до 10 и x от 2 до 5,5.

Используя уравнение (44), можно решать основные (типовые) задачи на неравномерное движение. При построении кривых свободной поверхности воды вся длина русла разбивается на отдельные участки длиной l , в которых глубины h_1 и h_2 изменяются на величину Δh .

Для достижения высокой точности расчётов необходимо учитывать, что при решении интеграла (43) Б.А. Бахметевым величина j принята постоянной, неизменяющейся от изменения глубины h . По Р.Р. Чугаеву [5] величина j может учитываться разными способами. При первом (менее точном способе) величина \bar{j} принимается постоянной по всей длине потока и определяется по формулам

$$\bar{j} = 0,5(j_1 + j_2) \quad (45)$$

или
$$\bar{j} = \frac{\alpha i_0 C_{cp}^2 B_{cp}}{g \chi_{cp}}, \quad (46)$$

где j_1 и j_2 – вычисляются по глубинам h_1 и h_2 в начале и в конце потока;

$C_{cp}, B_{cp}, \chi_{cp}$ – вычисляются по средней глубине всего потока $h_{cp}=0,5(h_1+h_2)$
с глубинами h_1 и h_2 .

Во втором (более точном способе) величина j принимается постоянной в пределах каждого расчётного участка и определяется по параметрам, подсчитанным по средней глубине на выделенном участке.

В отличие от допущения Б.А. Бахметева, практика показывает, что величина j в ряде случаев может изменяться значительно. Так, например, при расчёте кривой спада типа b_2 в узком русле (см. таблица 2) при изменении глубины с 2,0 м до 0,75 м (в 2,7 раза) величина j увеличивается более чем в 2 раза. Выразить зависимость между j и η в форме возможной для дальнейшего интегрирования не представляется возможным. Поэтому некоторые авторы, например, В.Д. Журин, И.И. Леви [18], А.Н. Рахманов [19] указывали на возможность использования соответствующих зависимостей для величины j , которые также являются приближёнными.

По предложению И.И. Леви величина j выражается через относительную глубину показательной зависимостью вида

$$\eta^{\nu} = S j, \quad (47)$$

откуда получим
$$j = \frac{\eta^{\nu}}{S}, \quad (48)$$

где S и ν – некоторые постоянные для рассматриваемой задачи коэффициент и показатель степени.

Значение S и ν определяются по формулам

$$\nu = \frac{\lg j_2 - \lg j_1}{\lg \eta_2 - \lg \eta_1}, \quad (49)$$

$$S = \frac{\eta_2^{\nu}}{j_2} \quad \text{или} \quad S = \frac{\eta_1^{\nu}}{j_1}, \quad (50)$$

где $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$, $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$ – крайние для рассматриваемой задачи относительные

глубины;

j_1 и j_2 – значения величины j , соответствующие относительным глубинам.

Установленная таким образом зависимость между величинами j и η оказывается совершенно точной для бесконечно узких прямоугольных русел, для которых $\nu = -1,0$, для бесконечно широких прямоугольных русел ($\nu = 1/3$).

Одним из точных способов преобразования и интегрирования дифференциального уравнения (36), выполненного без допущений, осреднений и введения приближённых зависимостей, является способ М.М. Скиба, который применим для расчёта неравномерного движения воды в призматических руслах трапецеидального, прямоугольного и треугольного поперечных сечений с прямым и нулевым уклонами дна [20].

В работе [20] приведены 8 примеров расчёта расстояния между сечениями с заданными глубинами и построения кривых подпора и спада при спокойном и бурном состояниях потока, выполненных разными способами – Б.А. Бахметева, Н.Н. Павловского, И.И. Агроскина и М.М. Скиба. Шаг изменения глубин в расчётных сечениях принимался в пределах $\Delta h = 0,05 \div 1,0 \div 2,0$ м. Результаты сравнения показывают, что искомая длина между крайними глубинами по способу М.М. Скиба не зависит от шага изменения глубин и числа расчётных участков. Для тех же условий искомая длина, определяемая другими способами, зависит от шага Δh и числа интервалов. Она тем больше приближается к расчётной по Скиба, чем меньше шаг изменения глубин Δh , а, следовательно, больше число интервалов (участков). Расхождение в длине между крайними глубинами при разном шаге Δh при расчётах по способу Б.А. Бахметеву достигает до 22%, по Н.Н. Павловскому – до 31%, по И.И. Агроскину – до 34% и более.

Для сравнения точности расчётов неравномерного движения воды в весьма узких руслах разными способами нами были использованы результаты решения частных примеров. Таких примеров было рассмотрено пять.

Значения ширины по дну b , величина расходов Q и крайних глубин были подобраны таким образом, чтобы значения относительных глубин $\frac{h_{cp}}{b}$ между крайними глубинами h_1 и h_2 изменялись в широком диапазоне, охватывающем

различные виды и типы кривых свободной поверхности.

Исходные данные для всех пяти примеров приведены в таблице 1. Здесь же, с целью получения представления о величинах скоростей течений, приведены величины средних скоростей v_1 и v_2 в крайних живых сечениях с глубинами h_1 и h_2 соответственно.

Таблица 1. Исходные данные к примерам расчётов

№ примера	i_0	b , м	Q , м ³ /с	h_0 , м	$h_{кр}$, м	h_1 , м	h_2 , м	$\frac{h_{cp}}{b}$	x	v_1 , м/с	v_2 , м/с	Тип кривой
1	0,20	0,5	4,223	0,73	2,00	2,00	0,75	2,75	2,17	4,22	11,26	спада b_2
2	0,20	0,2	1,689	1,16	2,00	2,00	1,17	7,92	2,08	4,22	7,22	спада b_2
3	0,04	0,2	0,900	1,37	1,31	1,38	2,00	8,45	2,05	3,26	2,25	подпора a_1
4	0,0	0,2	0,900	-	1,31	2,00	1,32	8,28	2,08	2,25	3,41	спада b_0
5	-0,20	0,3	0,640	0,28	0,80	3,00	0,80	6,33	2,22	0,71	2,65	спада b'

В первых трёх примерах с прямым уклоном дна были рассмотрены кривая спада типа b_2 и кривая подпора типа a_1 . В первых двух случаях глубина h_1 в крайнем сечении была принята равной критической глубине, а в третьем случае – нормальной глубине h_0 .

В русле с нулевым и обратным уклонами рассчитывались соответственно кривые спада типа b_0 и b' . Глубина h_2 в крайних сечениях принималась равной критической.

Относительные глубины, подсчитанные по средней глубине $h_{cp}=0,5(h_1+h_2)$, во всех пяти примерах составляли соответственно $\frac{h_{cp}}{b} = 2,75$; 7,92; 8,45; 8,28; и 6,33.

Коэффициент Шези определялся по формуле Маннинга $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, коэффициент шероховатости бетонной поверхности был принят равным $n = 0,013$.

Гидравлический показатель русла при расчётах по способу Б.А. Бахметева рассчитывался по формуле (41) М.Д. Чертоусова.

Переходя к описанию результатов расчётов, отметим, что все расчёты выполнялись с повышенной точностью.

При расчётах кривых свободной поверхности по способу Б.А. Бахметева табличные функции при всех уклонах определялись не с помощью известных таблиц [5], при использовании которых необходима двойная интерполяция, например, при $i_0 > 0$ по η и x , а с помощью программы, размещённой в интернете на сайте онлайн «Решение интеграла» [21]. Точность вычисления интегралов – до шестизначных цифр после запятой.

Расчёты неравномерного движения воды по способу В.И. Чарномского выполнялись с использованием ПЭВМ и программы «GVKRV», которая была разработана на кафедре гидравлики НГМА (Храпковский В.А., Григорович Г.А.) и используется в учебном процессе длительное время. При разработке программы интервал (шаг) между глубинами h_1 и h_2 в пределах расчётного участка был принят равным $\Delta h = 0,01$ м.

Пример 1. Определить длину L и построить кривую свободной поверхности между крайними глубинами при следующих данных:

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	i_0	$h_0, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_{кр}, \text{ м}$
4,223	0,50	0	0,013	0,20	0,73	2,00	0,75	2,00

Кривая спада типа b_2 . Поток находится в бурном состоянии.

Известно [5, 16, 17], что для весьма узких прямоугольных русел, показательная зависимость для модулей расхода является аналитически точной. Подтверждением этому может служить график логарифмической анаморфозы $2lgK = f(lgh)$ в виде прямой линии, построенный по расчётным данным для заданного прямоугольного сечения (рисунок 7). Гидравлический показатель русла определился с помощью графика как $x = tg\theta$, где θ – угол между прямой линией графика и вертикалью, равным $x = 2,17$. По М.Д. Чертоусову (41) $x = 2,17$, по Р.Р. Чугаеву (42) $x = 2,22$.

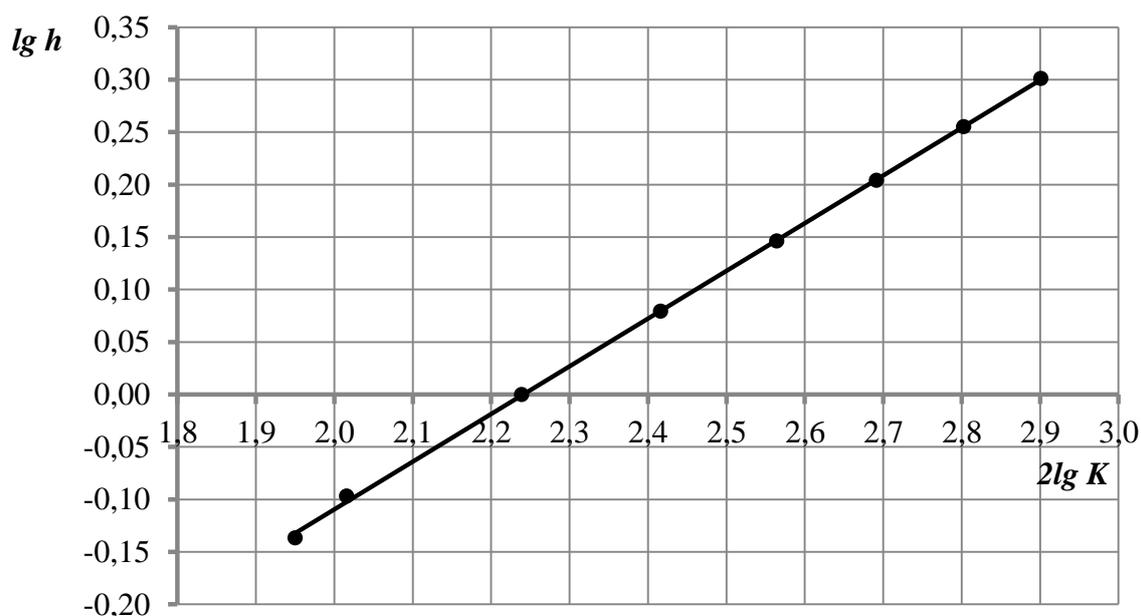


Рисунок 7 – Логарифмическая анаморфоза

Расчёты кривой *по способу Б.А. Бахметева* выполнялись по (44) при разном интервале (шаге) между глубинами h_1 и h_2 на расчётном участке - $\Delta h = 0,10\text{м}; 0,20\text{м}; 0,30\text{м}; 0,40\text{м}; 0,50\text{м}; 1,00\text{м}$. Результаты расчётов, выполненных разными способами, приведены в таблице 2. При расчётах по способу Б.А. Бахметева величина j_{cp} при шаге изменения глубин $\Delta h = 0,10\text{м}$ учитывалась четырьмя разными способами:

- рассчитывалась на каждом расчётном участке по формуле (45) $j_{cp} = 0,5(j_1 + j_2)$, где j_1 и j_2 – величины подсчитывались по глубинам h_1 и h_2 в начале и в конце выделенного участка (по Р.Р. Чугаеву – точный способ расчёта); данные расчёта приведены в 1-13 строках таблицы 2;

- рассчитывалась по формуле (46) на каждом участке по средней глубине $h_{cp} = 0,5(h_1 + h_2)$ выделенного участка (по Р.Р. Чугаеву – точный способ расчёта); данные расчёта приведены в строке 14 таблицы 2;

- рассчитывалась по формуле (45) $j_{cp} = 0,5(j_1 + j_2)$, где j_1 и j_2 – величины подсчитывались по глубинам $h_1 = 2,0\text{ м}$ и $h_2 = 0,75\text{ м}$ в начале и в конце потока; величина j_{cp} принималась одинаковой на всех расчётных участках (по Чугаеву – менее точный способ); данные расчёта приведены в строке 15 таблицы 2;

- рассчитывалась по формуле (46), в которой C_{cp} , B_{cp} , χ_{cp} подсчитывались

Таблица 2. Результаты расчёта кривой спада разными способами

 $Q=4,223 \text{ м}^3/\text{с}; b=0,5\text{м}; i_0=0,2; h_0=0,73 \text{ м}; h_{кр}=2,00 \text{ м}$ (кривая спада типа b_2)

№ п/п	h_1 , м	η_1	h_2 , м	η_2	$j_{cp} =$ $= \frac{j_1 + j_2}{2}$ ф. (45)	Расстояние от начала кривой при расчёте по способу											$\frac{h_{cp}}{b}$
						Б.А. Бахметева ($x=2,170$) с интервалом Δh							В.И. Чарном- ном- ского	М.М. Скиба	Фор- муле (54)		
						0,1 м	0,2 м	0,3 м	0,4 м	0,5 м	1,0 м	с j по Леви, 0,1м					
1	2,00	2,740	1,90	2,603	9,129	0,047	-	-	-	-	-	0,04	0,04	0,07	0,047	4,74	
2	1,90	2,603	1,80	2,466	9,545	0,201	0,18	-	-	-	-	0,22	0,20	0,23	0,203	3,70	
3	1,80	2,466	1,70	2,329	10,000	0,496	-	0,48	-	-	-	0,45	0,49	0,52	0,502	3,50	
4	1,70	2,329	1,60	2,192	10,501	0,972	0,95	-	0,94	-	-	0,89	0,95	0,92	0,991	3,30	
5	1,60	2,192	1,50	2,055	11,053	1,691	-	-	-	1,60	-	1,94	1,66	1,68	1,732	3,10	
6	1,50	2,055	1,40	1,918	11,667	2,748	2,72	2,70	-	-	-	2,96	2,70	2,70	2,826	2,90	
7	1,40	1,918	1,30	1,781	12,353	4,284	-	-	-	-	-	4,49	4,21	4,21	4,428	2,70	
8	1,30	1,781	1,20	1,644	13,124	6,531	6,47	-	6,33	-	-	6,66	6,43	6,46	6,795	2,50	
9	1,20	1,644	1,10	1,507	13,996	9,923	-	9,74	-	-	-	9,95	9,77	9,76	10,400	2,30	
10	1,10	1,507	1,00	1,370	14,990	15,307	15,16	-	-	14,48	12,78	13,07	15,11	15,08	16,208	2,10	
11	1,00	1,370	0,90	1,233	16,134	24,825	-	-	-	-	-	22,40	24,60	24,58	26,660	1,90	
12	0,90	1,233	0,80	1,096	17,463	46,851	46,11	45,22	44,17	-	-	44,23	46,93	46,67	51,490	1,70	
13	0,80	1,096	0,75	1,027	18,583	82,512	-	-	-	-	-	79,85	84,57	82,92	92,432	1,55	
14	2,00	$\Delta h=$ 0,10 м	0,75	по участ- кам	$j_{cp}=\text{форм.}$ (11)	$\Sigma l=$ 82,406	$\Delta l=$ -0,12%										
15	2,00	$\Delta h=$ 0,10 м	0,75	по уч- кам	$j_{cp}=13,959$ ф. (10)	$\Sigma l=$ 68,92	$\Delta l=$ -16,47%										
16	2,00	$\Delta h=$ 0,10 м	0,75	по уч- кам	$j_{cp}=12,164$ $h_{cp}=1,375\text{м}$ ф. (11)	$\Sigma l=$ 58,53	$\Delta l=$ -29,06%										

по средней глубине $h_{cp} = 0,5(2,0+0,75) = 1,375$ м всего потока с крайними глубинами $h_1 = 2,0$ м и $h_2 = 0,75$ м; величина j_{cp} принималась одинаковой на всех расчётных участках (по Чугаеву – менее точный способ); данные расчёта приведены в строке 16 таблицы 2.

Способ Б.А. Бахметева – И.И. Леви. Величина j в сечениях при выполнении расчётов по участкам с $\Delta h = 0,1$ м подсчитывалась по показательной зависимости (48) $j = \frac{\eta^v}{S}$, где параметры $v = -0,7801$ и $S = 0,05144$ были определены по (49) и (50).

Способ В.И. Чарномского. Расчётное уравнение при $i_0 > 0$ было приведено к виду, удобному для выполнения расчётов с использованием ПЭВМ,

$$\Delta S = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{i_0 - i_{fsc}}, \quad (51)$$

где $\mathcal{E} = h + \frac{\alpha v^2}{2g}$ – удельная энергия сечения;

$i_{cp} = \frac{v_{cp}^2}{C_{cp}^2 R_{cp}}$ – среднее значение уклона трения на расчётном участке.

Результаты расчёта расстояния от начала кривой через каждые 0,10 м изменения глубин при шаге $\Delta h = 0,01$ м даны в таблице 2.

Способ М.М. Скиба. Расчётное уравнение для неравномерного движения воды в призматических руслах при $i_0 > 0$ имеет вид [20]

$$\frac{i_0}{h_0} = F(\eta_2) - F(\eta_1) - \frac{\alpha Q^2 B_0}{g \omega_0^3} [\Phi(\eta_2) - \Phi(\eta_1)], \quad (52)$$

где l – длина расчётного участка между сечениями с глубинами h_1 и h_2 ,

относительными глубинами $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$, $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$;

$F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ – табличные функции М.М. Скиба, зависящие от η , $\beta_0 = \frac{b}{h_0}$, m ;

B_0 , ω_0 – ширина по урезу воды и площадь живого сечения при глубине h_0 .

Результаты расчёта приведены в таблице 2.

Новая формула. Для весьма узких прямоугольных русел при $i_0 > 0$ основные расчётные уравнения имеют вид

$$\frac{i_0 l}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - \int_1^2 \frac{1}{\eta^2} d\eta + D \int_1^2 \frac{1}{\eta - \eta^3} d\eta, \quad (53)$$

после интегрирования, которого, выразив длину расчётного участка, получим

$$l = \frac{h_0}{i_0} \left\{ \eta_2 - \eta_1 + \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + \eta_1)(1 - \eta_2)}{(1 - \eta_1)(1 + \eta_2)} + D \ln \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_1^2 - 1}}{\eta_1 \sqrt{\eta_2^2 - 1}} \right\}, \quad (54)$$

где $D = \left(\frac{h_{кр}}{h_0} \right)^3$.

Приведём расчёт расстояния между крайними глубинами $h_1 = 2,0$ м и $h_2 = 0,75$ м, приняв за расчётный участок всю длину. Определим при нормальной глубине $h_0 = 0,73$ м и критической $h_{кр} = 2,00$ м величину $D = \left(\frac{2,00}{0,73} \right)^3 = 20,5646$

и $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0} = 2,7397$, $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0} = 1,0274$.

Подставляем полученные значения в (54) и определяем длину участка

$$l = \frac{0,73}{0,20} \left\{ 1,0274 - 2,7397 + \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + 2,7397)(1 - 1,0274)}{(1 - 2,7397)(1 + 1,0274)} + 20,5646 \ln \frac{1,0274 \sqrt{2,7397^2 - 1}}{2,7397 \sqrt{1,0274^2 - 1}} \right\} = 92,44 \text{ м.}$$

Сравнение этой длины с данными расчёта кривой по новой формуле, приведёнными в таблице 2^{*)}, показывает, что при разбиении всей длины на 13 расчётных участков с интервалом изменения глубин $\Delta h = 0,10$ м, общая длина составила 92,43 м, что является признаком независимости точности расчётов неравномерного движения воды в весьма узких прямоугольных руслах по новой формуле от длины (числа) расчётного участка и принятого интервала изменения глубин.

^{*)} При вычислении определённых интегралов использовался интернет - ресурс [21].

Пример 2. В весьма узком прямоугольном русле определить длину и координаты кривой спада типа b_2 при следующих данных:

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	i_0	$h_0, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_{кр}, \text{ м}$
1,689	0,20	0	0,013	0,20	1,16	2,00	1,17	2,00

Поток находится в бурном состоянии. Гидравлический показатель русла по (41) равен $x = 2,077$. Результаты расчётов, выполненных разными способами, приведены в таблице 3.

В таблице на участке под №10 за расчётную длину принята вся протяжённость потока между крайними глубинами с интервалом $\Delta h = 0,83 \text{ м}$.

Пример 3. В том же русле с уклоном дна $i_0 < i_{кр}$, определить длину и координаты кривой подпора a_1 в зоне выше линии нормальных глубин:

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	i_0	$h_0, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_{кр}, \text{ м}$
0,900	0,20	0	0,013	0,04	1,37	1,38	2,00	1,31

Поток находится в спокойном состоянии. Гидравлический показатель русла по (41) равен $x = 2,055$. Результаты расчёта приведены в таблице 4.

В таблице по восьмой строке за расчётный участок принята вся длина потока между крайними глубинами $h_1 = 1,38 \text{ м}$ и $h_2 = 2,00 \text{ м}$ с $\Delta h = 0,62 \text{ м}$.

Пример 4. В том же русле уклоном дна $i_0 = 0$, определить длину l и координаты кривой спада типа b_0 , расположенной выше линии критических глубин, при данных:

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	i_0	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_{кр}, \text{ м}$	$i_{кр}, \text{ м}$
0,900	0,20	0	0,013	0	2,00	1,32	1,34	0,04386

По **Б. А. Бахметеву** при $i_0 = 0$ основное расчётное уравнение имеет вид

$$l = \frac{h_{кр}}{i_{кр}} \{ j_{кр} (\xi_2 - \xi_1) - [\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)] \}, \quad (55)$$

Таблица 3. Результаты расчёта кривой различными способами

$Q=1,689 \text{ м}^3/\text{с}$; $b=0,2 \text{ м}$; $i_0=0,2$; $h_0=1,16 \text{ м}$; $h_{кр.}=2,00 \text{ м}$. Кривая спада типа b_2 .

№ участка	h_1 , м	h_2 , м	Расстояние между глубинами, рассчитанное по способу									$\frac{h_{cp}}{b}$	
			Б.А. Бахметева ($x=2,077$)			В.И. Чарномского		М.М. Скиба		Формуле (54)			
			l_B , м	$\bar{c}j$ по Леви, м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %		
1	2,00	1,90	0,060	0,060	0,00	0,061	+1,67	0,085	+41,67	0,063	+5,00	9,75	
2	1,90	1,80	0,213	0,212	-0,47	0,215	+0,94	0,231	+8,45	0,220	+3,29	9,25	
3	1,80	1,70	0,431	0,430	-0,23	0,433	+0,46	0,382	-11,37	0,444	+3,02	8,75	
4	1,70	1,60	0,757	0,755	-0,26	0,762	+0,66	0,765	+1,06	0,780	+3,04	8,25	
5	1,60	1,50	1,281	1,276	-0,39	1,286	+0,39	1,297	+1,25	1,322	+3,20	7,75	
6	1,50	1,40	2,218	2,213	-0,22	2,230	+0,54	2,231	+0,59	2,296	+3,52	7,25	
7	1,40	1,30	4,280	4,274	-0,14	4,325	+1,05	4,296	+0,37	4,452	+4,02	6,75	
8	1,30	1,20	12,220	12,222	+0,02	12,655	+3,56	12,470	+2,04	12,840	+5,07	6,25	
9	1,20	1,17	15,239	15,236	-0,02	16,763	+10,00	15,310	+0,48	15,943	+4,62	5,92	
Σ			36,700	36,678	-0,06	38,730	+5,53	37,07	+1,01	38,360	+4,52		
10	2,00	1,17	31,164 -15,7%										

Примечание: При расчете j_{cp} по И.И. Леви $v = -0,9187$, $S = 5,1044$.

Таблица 4. Результаты расчёта кривой подпора различными способами

$Q=0,900 \text{ м}^3/\text{с}; i_0=0,04; b=0,2 \text{ м}; h_0=1,37 \text{ м}; h_{кр.}=2,00 \text{ м}$. Кривая подпора типа a_1 .

№ участка	h_1 , м	h_2 , м	Расстояние между глубинами, рассчитанное по способу									$\frac{h_{cp}}{b}$
			Б.А. Бахметева ($x=2,077$)			В.И. Чарномского		М.М. Скиба		Формула (54)		
			l_B , м	с \bar{j} по Леви, l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	с \bar{j} по Леви, l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	
1	1,38	1,40	2,913	2,924	+0,38	2,915	+0,07	3,238	-5,02	2,915	+0,07	6,95
2	1,40	1,50	6,457	6,447	-0,15	6,397	-0,88	6,192	-4,10	6,397	-0,93	7,25
3	1,50	1,60	4,421	4,422	+0,02	4,496	+1,70	4,361	-1,30	4,496	+1,69	7,75
4	1,60	1,70	3,911	3,913	+0,05	3,992	+2,07	3,874	-0,95	3,992	+2,07	8,25
5	1,70	1,80	3,651	3,652	+0,03	3,728	+2,11	3,649	-0,05	3,728	+2,11	8,75
6	1,80	1,90	3,483	3,484	+0,03	3,554	+2,04	3,468	-0,43	3,554	+2,04	9,25
7	1,90	2,00	3,357	3,359	+0,06	3,425	+2,03	3,341	-0,48	3,425	+2,03	9,75
Σ			28,193	28,201	+0,03	28,507	+1,11	28,123	-0,25	28,507	+1,11	
8	1,38	2,00	33,591 (+19,15%)									

Примечание: При расчёте \bar{j} по И.И. Леви $v = -0,9252; S=1,1385$.

где $\xi_1 = \frac{h_1}{h_{кр}}$, $\xi_2 = \frac{h_{21}}{h_{кр}}$ – относительные глубины в сечениях;

$\varphi(\xi)$ – табличные функции Бахметева, зависящие от гидравлического показателя русла ($x=2,083$) и относительных глубин.

По *М.М. Скиба* [20] при $i_o=0$ основное расчётное уравнение имеет вид

$$l = \frac{h_{кр}}{i_{кр}} \{ \theta(\xi_2) - \theta(\xi_1) \}, \quad (56)$$

где $\theta(\xi) = f\left(\xi; \beta_k = \frac{b}{h_{кр}}\right)$ – табличные функции М.М. Скиба.

Новая формула. Расчётное уравнение при $i_o=0$ имеет вид

$$l = \frac{h_{кр}}{i_{кр}} \left\{ \int_1^2 \frac{1}{\eta_{кр}} d\eta_{кр} - \int_1^2 \eta_{кр}^2 d\eta_{кр} \right\},$$

или

$$l = \frac{h_{кр}}{i_{кр}} \left\{ \ln \frac{\eta_{кр2}}{\eta_{кр1}} + \frac{\eta_{кр1}^3 - \eta_{кр2}^3}{3} \right\}, \quad (57)$$

где $\eta_{кр1} = \frac{h_1}{h_{кр}}$, $\eta_{кр2} = \frac{h_2}{h_{кр}}$ – относительные глубины.

Результаты расчёта кривой спада приведены в таблице 5.

Определим расстояние между крайними глубинами $h_1 = 2,00$ м, $\eta_1 = 1,5216$ и $h_2 = 1,32$ м, $\eta_2 = 1,005$. Шаг изменения глубин равен $\Delta h = 0,68$ м.

$$l = \frac{1,34}{0,04386} \left\{ \ln \frac{1,005}{1,5216} + \frac{1,5216^3 - 1,005^3}{3} \right\} = 12,639 \text{ м.}$$

Данные, приведённые в таблице, показывают, что сумма длин всех участков, при условии разбиения всего потока на 7 участков, тоже равна $l = 12,639$ м, что свидетельствует о независимости точности расчёта при $i_o = 0$ по новой формуле от числа расчётных участков и шага изменения глубин Δh на них.

Пример 5. В весьма узком русле с обратным уклоном дна определить расстояние между заданными глубинами $h_1 = 3,00$ м и $h_2 = 0,804$ м.

Кривая спада b' . Поток находится в спокойном состоянии.

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$b, \text{ м}$	m	n	i_0	$h'_0, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_{кр}, \text{ м}$
0,640	0,20	0	0,013	-0,20	0,28	3,00	0,804	0,80

Результаты расчётов даны в таблице 6. Гидравлический показатель русла по (41) равен $x=2,216$.

По **Б.А. Бахметеву** [5] основное расчётное уравнение имеет вид

$$l = \frac{h'_0}{i'_0} \left\{ -(\zeta_2 - \zeta_1) + (1 + \bar{j}') [\varphi(\zeta_2) - \varphi(\zeta_1)] \right\} \quad (58)$$

В таблице на участке под №12 за расчётную принята вся длина потока между крайними глубинами $h_1=3,00$ м и $h_2=0,804$ м.

Для русел с $i_0 < 0$ способа расчёта по **М.М. Скиба** нет.

Новая формула. Расчётное уравнение неравномерного движения в весьма узких руслах при $i_0 < 0$ имеет вид

$$l = \frac{h'_0}{i'_0} \left\{ -\int_1^2 d\eta + D \int_1^2 \frac{1}{\eta^3 + \eta} d\eta + \int_1^2 \frac{1}{1 + \eta^2} d\eta \right\}^* \quad (59)$$

или

$$l = \frac{h'_0}{i'_0} \left\{ \eta_2 - \eta_1 + D \ln \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_1^2 + 1}}{\eta_1 \sqrt{\eta_2^2 + 1}} \operatorname{arctg} \frac{\eta_2 - \eta_1}{1 + \eta_1 \eta_2} \right\} \quad (60)$$

Приведём расчёт расстояния между крайними глубинами $h_1=3,00$ м, $\eta_1 = \frac{h_1}{h'_0} = 10,7143$ и $h_2=0,804$ м, $\eta_2 = \frac{h_2}{h'_0} = 2,8714$.

В формуле (60) коэффициент $D = \left(\frac{h_{кр}}{h'_0} \right)^3 = \left(\frac{0,80}{0,28} \right)^3 = 23,3236$.

Подставляем полученные значения η и D в (60) и определяем

$$l = \frac{0,28}{0,20} \{ 10,7143 - 2,8714 + 23,3236(-0,0529017) + (-0,242062) \} = 8,914 \text{ м.}$$

*) Решение определённых интегралов было получено с помощью [21].

Таблица 6. Результаты расчёта кривой спада различными способами

$Q=0,640 \text{ м}^3/\text{с}; i_0 = -0,200; b=0,2 \text{ м}; h'_0=0,28 \text{ м}; h_{кр}=0,80 \text{ м}$. Кривая спада типа b' .

№ участка	h_1 , м	h_2 , м	Расстояние между глубинами, рассчитанное по способу							$\frac{h_{ср}}{b}$
			Б.А. Бахметева ($x=2,077$)			В.И. Чарномского		Формуле (60)		
			l_B , м	$c\bar{j}$ по Леви, l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	l , м	отклонение от l_B , %	
1	3,00	2,80	0,979	0,974	-0,51	0,973	-0,61	0,970	-0,92	14,5
2	2,80	2,60	0,968	0,968	0,00	0,968	0,00	0,964	-0,41	13,5
3	2,60	2,40	0,960	0,960	0,00	0,960	0,00	0,955	-0,52	12,5
4	2,40	2,20	0,949	0,949	0,00	0,973	+2,53	0,945	-0,42	11,5
5	2,20	2,00	0,933	0,934	+0,11	0,910	-2,46	0,928	-0,53	10,5
6	2,00	1,80	0,908	0,911	+0,33	0,912	+0,44	0,905	-0,33	9,5
7	1,80	1,60	0,873	0,877	+0,46	0,880	+0,80	0,871	-0,23	8,5
8	1,60	1,40	0,816	0,822	+0,74	0,828	+1,47	0,818	+0,24	7,5
9	1,40	1,20	0,725	0,729	+0,55	0,741	+2,21	0,730	+0,69	6,5
10	1,20	1,00	0,553	0,558	+0,90	0,584	+5,60	0,572	+3,44	5,5
11	1,00	0,804	0,209	0,208	-0,48	0,263	+25,84	0,256	+22,49	4,5
Σ			8,873	8,890	+0,19	8,992	+1,34	8,914	+0,46	
12	3,00	0,804	13,020 +46,7%							

По расчёту 11 участков между крайними глубинами $h_1 = 3,00$ м и $h_2 = 0,804$ м, представленными в таблице 6, суммарная длина тоже равна $l = 8,914$ м.

Заканчивая на этом пояснение тех расчётов, которые были выполнены для сравнения разных способов построения кривых свободной поверхности воды в весьма узких прямоугольных руслах, можно сделать основные выводы, вытекающие из всего вышеизложенного:

1. Основным способом расчёта неравномерного движения воды в призматических руслах считается способ Б.А. Бахметева [5]. Однако, как показали выполненные расчёты в «обычных» [20], так и в весьма узких руслах точность результатов зависит от шага изменения глубин (интервала). Так в первом примере ($Q = 4,223$ м³/с) при шаге $\Delta h = 0,5$ м и $\Delta h = 1,0$ м относительное расхождение (ошибка) в расстоянии между глубинами на границах расчётного участка было равно, соответственно, $- 5,4$ % и $- 16,5$ %, во втором примере ($Q = 1,689$ м³/с) при $\Delta h = 0,83$ м расхождение $- 15,8$ %, в третьем примере ($Q = 0,900$ м³/с) при $\Delta h = 0,62$ м расхождение составило $+13,1$ %.

На точность расчётов влияет и способ учёта величины j_{cp} . Для случая, когда величина j_{cp} принимается одинаковой на всех расчётных участках (менее точный способ) (см. табл. 2 строки 15, 16), установлено, что две

известные формулы $\bar{j} = 0,5(j_1 + j_2)$ (45) и $\bar{j} = \frac{\alpha i_0 C_{cp}^2 B_{cp}}{g \chi_{cp}}$ (46) являются не

равнозначными. Относительная ошибка в расстоянии между крайними глубинами $h_1 = 2,00$ м и $h_2 = 0,75$ м при шаге $\Delta h = 0,10$ м в первом примере при использовании в расчётах формулы (45) составляет $- 16,5$ %, а при использовании (46) $- 29,1$ %.

Результаты расчётов с учётом величины j_{cp} по И.И. Леви показывают, что точность расчётов остаётся практически такой же, как и в точном

способе Б.А. Бахметева, однако при расчётах по И.И. Леви заметно уменьшается объём вычислений и затраты времени.

Для обеспечения высокой точности расчётов неравномерного движения воды в весьма узких прямоугольных руслах по способу Б.А. Бахметева необходимо шаг изменения глубин Δh или длину расчётных участков принимать относительно небольшими, а величину j_{cp} рассчитывать на каждом участке по любой из формул (45) или (46).

Для расчёта гидравлического показателя русла x в весьма узких прямоугольных руслах может быть использована формула (42) Р.Р. Чугаева, дающая относительное расхождение с (41) не более 2-5%.

2. Результаты расчётов неравномерного движения воды в весьма узких прямоугольных руслах, выполненных разными способами – Б.А. Бахметева, В.И. Чарномского, М.М. Скиба и по новым формулам показывают, что все рассмотренные способы по точности являются близкими. Выделить из них более точный или менее точный способ не представляется возможным. Относительное расхождение в расстоянии между крайними глубинами во всех пяти примерах по разным способам расчёта в 90% случаев не превышает 1-2%.

3. Результаты расчётов неравномерного движения воды в весьма узких прямоугольных руслах по новым формулам, полученным для уклонов дна $i > 0$, $i = 0$ и $i < 0$, показывают, что точность расчётов не зависит от шага изменения глубин или длины расчётных участков. Поэтому к достоинствам способа расчёта по новым формулам следует отнести возможность определения в один приём (без разбивки на участки) длины кривой свободной поверхности между заданными глубинами, расположенными на значительном расстоянии. Кроме того, при практических расчётах не требуется выполнения большого количества вычислений, связанных с определением ω , χ , R , C , K , x , j , ν и др., хотя и простых по своему существу. При

расчётах не требуется использования никаких справочных таблиц, достаточно лишь знать относительные глубины в сечениях.

4. Сравнительно большое расхождение + 12% в расстоянии между крайними сечениями по новой формуле в первом примере (см. таблица 2), в котором поперечное сечение, строго говоря, не является весьма узким

$\frac{h_{cp}}{b} = 4,75 \div 1,55$, может служить подтверждением того, что принятый ранее

критерий для признания весьма узких прямоугольных русел в виде вели-

чины $\frac{h}{b} > 4$ из условия равномерного движения (на основе анализа из

формулы Шези) будет справедлив как $\frac{h_{cp}}{b} > 4$ и из условия неравномерно-

го движения воды в весьма узких прямоугольных руслах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водопроводящие сооружения в виде искусственных русел (каналов и лотков), являются самыми распространёнными элементами водохозяйственных систем различного назначения. При проектировании искусственных русел основной задачей является установление оптимального соотношения гидравлических и геометрических параметров поперечного профиля, обеспечивающего расчётную (максимально возможную) пропускную способность русла – гидравлически наивыгоднейшего поперечного профиля. Этот же подход используется и при обосновании параметров водопроводящих частей гидротехнических сооружений комплексного назначения.

Вместе с тем развитие гидротехнического строительства, в первую очередь специальных сооружений, связано с применением современных

технических решений, обеспечивающих решение технологических задач основанных на использовании новой техники, технологии и материалов, вступающих в противоречие с принципами гидравлической оптимизации. В этом отношении весьма узкие русла представляют как практический, так и теоретический интерес.

Исследование неравномерного установившегося движения водного потока в весьма узких руслах является развитием существующих более века способов расчёта отечественных учёных. В основе исследований неравномерного установившегося движения потока воды в условиях весьма узких русел, используется способ Б.А. Бахметева. Принятые в работе допущения о независимости смоченного периметра от ширины русла ($\chi = 2h$) и гидравлического радиуса от глубины потока ($R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{b}{2}$) и его постоянстве на всем участке движения потока, а также допущение о том, что коэффициент Шези $C = f(n, R)$ зависит от коэффициента шероховатости стенок русла и гидравлического радиуса, и не зависит от глубины потока, позволили получить точное решение дифференциальных уравнений и значительно упростить расчёты.

Приведённые в работе примеры сопоставления расчётов по новым формулам с известными способами Б.А. Бахметева-И.И. Леви, В.И. Чарномского, М.М. Скиба свидетельствуют о том, что полученные точные решения дифференциальных уравнений позволяют выполнять расчёты параметров потока воды без использования справочных таблиц и большого количества промежуточных вычислений характеристик.

За пределами настоящего исследования остаются вопросы, которые найдут свое развитие в дальнейших исследованиях авторов, а именно оценка влияния шероховатости стенок весьма узких русел на характер движения и количественные параметры потока воды.

Список использованных источников

1. Агроскин, И.И. Гидравлика /И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – 3-е изд. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 484 с.
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика /Д.В. Штеренлихт. – М.: КолоС. 2002. – 655 с.
3. Косиченко, Ю.М. Гидравлика: курс лекций для мелиораторов /Ю.М. Косиченко, П.М. Степанов, В.И. Храпковский. – Новочеркасск, 1998. Часть II. – 92 с.
4. Справочник по гидравлике /Под ред. В.А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа Головное изд-во, 1984. – 343 с.
5. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: учеб. для вузов /Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
6. Справочник по гидравлическим расчётам /Под ред. П.Г. Киселёва. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
7. Гришанин, К.В. Динамика русловых потоков /К.В. Гришанин. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 311 с.
8. Ибад-заде, Ю.А. Транспортирование воды в открытых каналах /Ю.А. Ибад-заде. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
9. Карасёв, И.Ф. Русловые процессы при переброске стока /И.Ф. Карасёв. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.
10. Карасёв, И.Ф. Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов /И.Ф. Карасёв. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
11. Киселев, П.Г. Гидравлика: основы механики жидкости /П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
12. Железняков, Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек /Г.В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
13. Тепакс, Л. Равномерное турбулентное движение в трубах и каналах /Л. Тепакс. – Таллин: Валгус, 1975. – 256 с.
14. Михеев, П.А. Интегрирование уравнения неравномерного движе-

ния воды для условий весьма узких русел с обратным уклоном дна /П.А. Михеев, А.И. Перельгин, В.А. Храпковский //Гидротехническое строительство: матер. регион. науч.-техн. конф. «Гидротехника, гидравлика и геоэкология». Вып. 2. /ФГОУ ВПО НГМА – Новочеркасск: Лик 2009. – С. 3–10.

15 Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов /В.Т. Чоу. – М.: Стройиздат, 1969.

16. Чертоусов, М.Д. Инженерная гидравлика /М.Д. Чертоусов. – Л.: Изд-во Кубуч, 1934.

17. Бахметев, Б.А. О неравномерном движении воды в открытых руслах /Б.А. Бахметев. – М.: Изд-во Кубуч, 1928.

18. Леви, И.И. Гидравлические показатели русла и их приложение к теории неравномерного движения в открытых каналах и руслах /И.И. Леви //Вестник ирригации, г. Ташкент; изд. Управления водного хозяйства Средней Азии, 1925. - №2.

19. Рахманов, А.Н. О построении кривых свободной поверхности в призматических и цилиндрических руслах при установившемся движении /А.Н. Рахманов //Известия научно-исследовательского института гидротехники. – Л., 1931. - №3, №4.

20. Скиба, М.М. Практическая гидравлика для ирригаторов /М.М. Скиба. – М.: Колос, 1966.

21.[URL:http://www.matematikam.ru/calculate-online-integrall.php](http://www.matematikam.ru/calculate-online-integrall.php).

Содержание

Введение	3
1. Особенности движения потока воды в узких руслах	4
2. Оценка гидравлических элементов живого сечения потока в весьма узких призматических руслах	6
3. Интегрирование уравнения неравномерного движения для усло- вий прямоугольного весьма узкого русла с обратным уклоном дна ($i < 0$)	13
4. Интегрирование уравнения неравномерного движения для усло- вий прямоугольного весьма узкого русла с прямым уклоном дна ($i > 0$)	16
5. Интегрирование уравнения неравномерного движения для усло- вий прямоугольного весьма узкого русла с горизонтальным дном ($i = 0$)	18
6. Сравнение расчётов неравномерного движения воды в весьма узких руслах прямоугольного сечения различными способами ...	20
Заключение.....	41
Список использованных источников	43

Научное издание

Михеев Павел Александрович
Храпковский Виктор Абрамович
Перельгин Андрей Иванович
Ширяев Вадим Николаевич

**НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ
В ВЕСЬМА УЗКИХ РУСЛАХ**

Издаётся в авторской редакции

Подписано в печать 20.10. 2013 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Усл. печ. л. 1,95. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство ООО «Лик»
346430, г. Новочеркасск ул. Красноармейская, 18

Типография НГМА, 346428, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111.

