

А. Н. МАЛЯВКИН

Кандидат геолого-минералогических наук

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ РУСЛОВЫХ МЕЛИОРАЦИЯХ Порогов малых рек для молевого сплава леса

Мелиорации русла порога небольшой сплавной реки ставят перед проектировщиком задачу искусственного изменения русла порога для возможности сплава леса при минимальном расходе воды без сооружения на пороге лотка, требующего одновременно и постройки плотины. Эта задача расчленяется на две, наиболее часто встречающиеся в практике проектирования: 1) создать на пороге уровень водной поверхности, обеспечивающий при данном минимальном расходе воды необходимые глубины для целей молевого сплава леса; 2) обеспечить пропускную способность порога при прохождении паводковых вод, не превышая предельного уровня и критических скоростей течения воды.

Для выполнения гидравлического расчета по первой задаче известными величинами предполагаются: расход воды Q_c (сплавной расход), определенный водохозяйственным расчетом, глубина h_c (глубина, необходимая для сплава), бытовой уклон порога i .

Требуется установить те необходимые русловые изменения, которые обеспечили бы данную глубину h_c , в частности необходимо определить ширину мелиорированного русла при данной сплавной глубине.

Вторая задача требует пропуска паводкового расхода воды Q_n , определенного гидравлическим расчетом, при уклоне порога i и предельно допустимых: глубине h_n и скорости v_n , не превосходящей критической скорости для русла порога во избежание размыва его. Решение второй задачи определяет окончательно форму поперечного сечения русла порога в его верхней части.

Для пропуска молевого сплава через пороги с наименьшей затратой воды сооружаются лотки с плотиной. Постройка плотины и лотка, хотя и коренным образом улучшает условия сплава, требует, однако, затраты крупных средств на постройку, ежегодный ремонт и на эксплуатационный шаг для работы при пропуске лесосплава и ледохода и для охраны сооружений. Поэтому целью настоящей статьи является выяснение возможности проведения несложных русловых мелиораций, при

которых порог по своему естественному руслу мог бы пропустить сплавляемый лес.

При значительных уклонах русла, существующих на порогах, создавались бы большие скорости, и для обеспечения необходимой сплавной глубины потребовался бы значительный расход воды, если бы большая шероховатость русла порога не способствовала увеличению глубин при данном расходе. Поэтому не рекомендуется удаление всех камней из русла порога, так как это сильно уменьшило бы коэффициент шероховатости русла и повело бы к увеличению скоростей, размыванию русла и уменьшению глубин.

Обычно практикуемые мелиорации в этом случае состоят в расчистке русла только от самых крупных, мешающих сплаву камней, являющихся причиной заломов на пороге (так называемых «причинных») и устройстве бревенчатых стенок или ряжевых дамб по берегам порога, служащих, с одной стороны, для направления сплава по расчищенному руслу порога, а с другой — для сужения русла с целью увеличения глубин.

Рассмотрим на конкретном примере гидравлическую картину, получающуюся в этом случае. Возьмем небольшую речку, имеющую площадь водосбора у порога 70 км^2 . Средний годовой расход ее, при норме стока для рек Карелии $10 \text{ л/с с } 1 \text{ км}^2$, будет $Q_{\text{ср}} = 0,7 \text{ м}^3/\text{сек}$. При озерной площади водосбора $5-8\%$ имеем максимальный паводковый расход:

$$Q_{\text{п}} = 0,330 \cdot 70 = 23 \text{ м}^3/\text{сек. (см. Литерат., 8)}.$$

Для такого типа реки можем принять среднюю естественную ширину порога $B = 10 \text{ м}$. Имея в виду необходимую продолжительность сплава на небольшой реке не менее 15 суток, рассчитываем на естественный расход паводка, обеспеченный в течение этого периода непосредственно после ледохода. Он составляет не более 400% от среднего годового. Таким образом принимаем за сплавной расход

$$Q_{\text{с}} = 4Q_{\text{ср}} = 4 \cdot 0,7 = 2,8 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Для проведения гидравлического расчета с целью определения необходимой ширины сплавного русла при сплавной глубине $h_{\text{с}} = 0,50 \text{ м}$ необходимо принять коэффициент шероховатости русла, соответствующий этой глубине при русле порога, расчищенного от крупных, мешающих сплаву камней.

На основании анализа графиков изменения коэффициента шероховатости (К.Ш.), приведенных в прежних работах автора (6 и 9), подбираем уравнения: 1) для порогов в естественном состоянии, 2) мелиорированных порогов и 3) для карешки.

По характеру кривых устанавливаем, что значение К.Ш. при уменьшении глубин до значений, близких к нулю, стремится к бесконечно большому величинам, а при увеличении глубин уменьшается до определенного предела.

Обе ветви кривой $K.Ш. = f(h_{\text{ср}})$ асимптотически приближаются одна к прямой, параллельной оси ординат (ось К.Ш.), а другая — к прямой, параллельной оси абсцисс (ось $h_{\text{ср}}$). Такой кривой соответствует уравнение параболы общего вида: $xy = m$. Так как бесконечно большое значение К.Ш. наступает при $h_{\text{ср}}$, отличающемся от нуля на какую-то величину «а», а наименьшее значение К.Ш. равно какому-то конечному пределу «b», то можем уравнение параболы для кривой К.Ш. переписать:

$$(h_{\text{ср}} - a) \cdot (\gamma - b) = m, \text{ где:}$$

γ — обозначение К.Ш.; $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина живого сечения; a — значение средней глубины при $\gamma = \infty$; b — наименьшее значение К.Ш. при больших глубинах на пороге; m — числовой коэффициент, определяющий форму кривой.

Решая уравнение в отношении К.Ш., получаем:

$$\gamma = \frac{m}{h_{\text{ср}} - a} + b$$

Это общий вид уравнения для всех кривых К.Ш. для порожистых участков (каменистых русел).

По частным значениям γ (в формуле Базена) и n (в формуле Гангилье и Кугтера) для каждого типа порогов определяем a , b и m , и найденные величины подставляем в общую формулу. Тогда для каждого типа порогов получаем следующие выражения для К.Ш.

1) Для порогов в естественном состоянии с большим количеством камней (малые реки)

$$\gamma = \frac{1}{h_{\text{ср}} - 0,2} + 4 \quad (1)$$

$$n = \frac{0,004}{h_{\text{ср}} - 0,2} + 0,07 \quad (2)$$

2) Для порогов мелиорированных (расчищенных от крупных камней, мешающих сплаву)

$$\gamma = \frac{0,5}{h_{\text{ср}} - 0,15} + 2 \quad (3)$$

$$n = \frac{0,005}{h_{\text{ср}} - 0,15} + 0,04 \quad (4)$$

3) Для карешки

$$\gamma = \frac{0,1}{h_{\text{ср}} - 0,1} + 2 \quad (5)$$

$$n = \frac{0,001}{h_{\text{ср}} - 0,1} + 0,037 \quad (6)$$

Полученные уравнения дают возможность при расчете определять наиболее вероятные значения К.Ш. при изменении глубины на пороге.

Возвратимся к гидравлическому расчету порога малой реки. Предполагая, что простейшие мелиорации произведены (уборка крупных камней), примем коэффициент шероховатости Базена γ по формуле (3), которая дает для глубины $h_{\text{ср}} = 0,50$, $\gamma = 3,4$.

Ввиду высокой шероховатости русла кривую спада считаем ограниченной верхним участком. На пороге устанавливается равномерный режим. Определение необходимой ширины русла при $Q_c = 2,8 \text{ м}^3/\text{с}$ и глубине $h_c = 0,50 \text{ м}$ производим подбором, располагая вычисления в таблице 1.

Таблица 1

Подбор ширины сплавного русла

b_c	ω	p	R	C	l	\sqrt{R}	v	Q_c	q
4.0	2.0	5.0	0,400	12,2	0,03	0,1732	1,340	2,68	0,670
4.2	2,1	5,2	0,404	12,3	1,354	2,84	0,677
4.1	2,05	5,1	0,402	12,25	1,348	2,76	0,673

По интерполяции находим точное значение сплавной ширины русла $b_c = 4,15$ м. При сужении русла с 10 м до 4,15 м при найденном К.Ш. можно достигнуть сплавной глубины, обеспеченной в течение 15 суток после прохождения ледохода. Конструктивно этого можно достигнуть устройством невысоких береговых дамб до уровня сплава ($h = 0,5$ м), суживающих русло до 4,15 м. Для установления степени увеличения сплавного расхода при гладких стенках береговых дамб воспользуемся формулой академика Н. Н. Павловского для коэффициента Шези C для водотоков с неоднородными стенками (12):

$$C_r = C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + a_2}{a_2 \cdot C_1^2 + C_2^2}} \quad (7),$$

где: C_r — коэффициент Шези для канала с неоднородными стенками;

C_1 — коэффициент Шези для части периметра p_1 , составляющего дно естественного русла;

C_2 — коэффициент Шези для части периметра p_2 , составляющего бревенчатые стенки канала;

a_2 — отношение двух упомянутых периметров: $a_2 = \frac{p_1}{p_2}$.

В нашем случае $C_1 = 12,3$. Для нахождения C_2 принимаем К.Ш. для бревенчатых стенок $\gamma = 0,16$, тогда $C_2 = 69,2$; $a_2 = \frac{1,0}{4,15} = 0,24$. Нахо-

дим $C_r = 13,6$; $Q_c = \omega C_r \sqrt{Ri} = 3,1$ м³/сек. При этом К.Ш. для неоднородного русла может быть найден или по формуле:

$$\gamma = \frac{(87 - C_r) \cdot \sqrt{R}}{C_r} \quad (8),$$

или непосредственно по формуле академика Н. Н. Павловского для русел с неоднородными стенками (12).

Определяем критическую глубину для

$$q = \frac{Q_c}{b_c} = \frac{2,8}{4,15} = 0,675 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = 0,423 \text{ м} \quad (9),$$

где: q — расход воды на 1 м ширины водотока; α — корректив скорости 1,1; h_k — критическая глубина; g — ускорение силы тяжести.

Сплавная глубина более критической, ввиду больших К.Ш. порога, что обеспечивает плавное сопряжение кривых спада и подпора на верхнем и нижнем участках порога при переходе его в плесовые участки.

Для постепенного перехода значительных скоростей порога к малым плесовым, в верхней и нижней частях порога следует запроектировать плавное сопряжение ряжей с берегами плесовых участков.

Рассмотрим выполнение второго условия задачи, а именно: пропуск максимального паводкового расхода при возможно низких горизонтах воды. Это условие предусматривает увеличение пропускной способности порога, которое при данном постоянном уклоне повлечет увеличение гидравлического радиуса и уменьшение К.Ш. при общем увеличении живого сечения водотока.

Определим глубину h_n при пропуске паводкового расхода $Q_n = 23 \text{ м}^3/\text{сек.}$, имея ширину прямоугольного сечения $b_c = 4,15$ и уклон водотока $i = 0,03$. Боковые стенки считаем бревенчатыми, дно естественной шероховатости. Задаваясь глубиной, определяем все гидравлические элементы, считая К.Ш. канала с неоднородными стенками γ_r переменным, ввиду изменения в живом сечении отношения a_2 отдельных частей периметра (деревянных стенок и дна порога) при изменении глубины и зависимости К.Ш. от глубины.

Коэффициент шероховатости γ_1 для русла определяем по формуле (3), а К.Ш. для канала с неоднородными стенками по формулам (7 и 8). Результаты вычислений помещаем в таблице 2

Таблица 2.

Определение глубины h_n при максимальном расходе паводка в канале прямоугольного сечения с переменным К. Ш. и неоднородными стенками

h_n	p	ω	γ_1	γ_2	a_2	γ_r	R	C_r	\sqrt{i}	v	Q	q
1,0	6,15	4,15	2,58	0,16	0,480	2,22	0,675	23,5	0,1732	3,27	13,6	3,28
1,5	7,15	6,23	2,37	..	0,723	1,85	0,872	29,2	„	4,73	28,5	6,87
1,3	6,75	5,40	2,43	..	0,627	1,90	0,800	27,8	„	4,30	23,2	5,59

Расчетом устанавливаем $h_n = 1,30$ м. Повышение уровня над сплавным горизонтом на 0,80 м сравнительно небольшое, но сильно увеличивается скорость до $v = 4,3$ м/сек., ввиду уменьшения К.Ш. с 3,40 до 1,90 за счет повышения уровня и возрастания отношения a_2 . При такой скорости может быть разрушено даже каменистое русло порога и подмыты и снесены береговые дамбы. Критическая глубина в этом случае по формуле (9) будет равна $h_k = 1,52 > h_n = 1,30$, поэтому в верхней части порога образуется кривая спада, в нижней части, при сопряжении с плесом, можно ожидать гидравлический прыжок.

Для снижения уровня при паводке, а главное для уменьшения скорости течения на пороге и уменьшения прыжка на нижнем плесе, рассмотрим следующий вариант русловых мелиораций порога. Сужение русла производим только на высоту, соответствующую глубине сплава $h_c = 0,50$ м, а выше русло оставляем естественной ширины ($B = 10$ м) для пропуска паводкового расхода. Для увеличения К.Ш. береговых

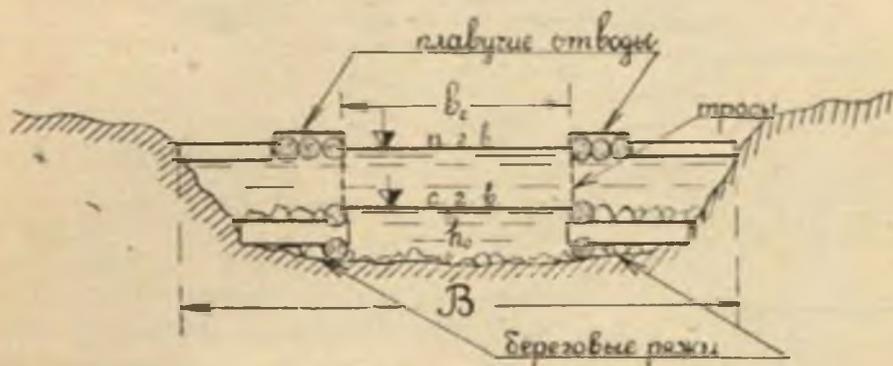


Рис. 1.

ряжей проектируем их решетчатой конструкции, при которой между нижним и верхним продольными венцами выступают углы камней, увеличивающие шероховатость. Верх ряжей также остается открытым с усиленной шероховатостью каменной заброски. Для исключения заломов бревен на береговых участках, вдоль стенок ряжей проектируем плавучие отводы (рис. 1).

Рассмотрим гидравлическую картину сложного живого сечения, работающего при пропуске паводка (рис. 2).

Для определения глубины h_n задаемся различными глубинами на средней части русла, получаем глубины на боковых его частях, как $h_n - h_c$. т. е. $h_n - 0,50$, и определяем расход воды Q_n , как сумму двух расходов, проходящих через среднюю часть Q_2 и боковые части ($Q_1 + Q_3$).

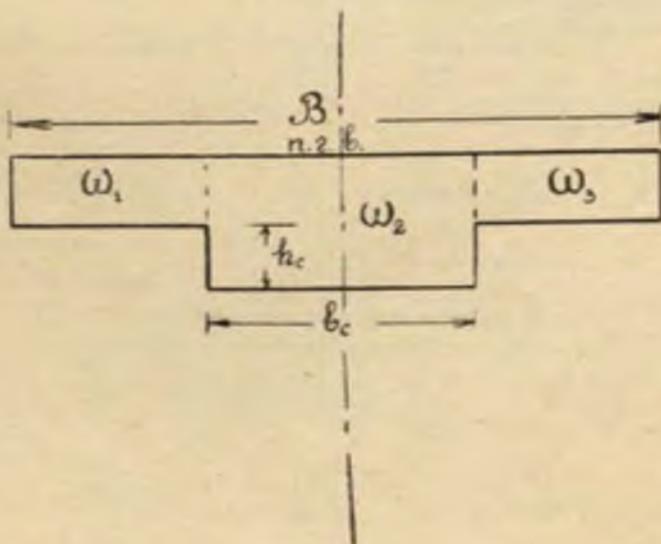


Рис. 2.

Таблица 3

Определение глубины при паводке в сложном русле

h_n	ω_2	$\omega_1 + \omega_2$	P_2	$P_1 + P_3$	R_2	R_1	\sqrt{I}	γ_2
1,0	4,15	2,92	5,15	6,85	0,81	0,43	0,1732	2,57
4,10	4,57	3,51	5,35	7,05	0,85	0,50	—	2,50

Продолжение

γ_1	C_2	C_1	V_2	V_1	Q_2	$Q_1 + Q_3$	Q_n
3,37	22,5	14,1	3,49	1,59	14,50	4,64	21,14
3,07	23,5	16,2	3,77	1,98	17,24	6,94	24,18

Коэффициенты шероховатости γ_2 и γ_1 определяются в зависимости от глубины отдельно в среднем и береговых участках живого сечения по формуле (3). Ввиду незначительного расхождения найденных (табл. 3) расходов от $Q_n = 23 \text{ м}^3/\text{сек.}$ находим по интерполяции промежуточную точку для заданного Q_n , соответствующую $h_n = 1,06 \text{ м.}$

Определим критическую глубину для сложного сечения при пропуске максимального паводкового расхода из равенства:

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha \cdot Q^2}{g} = 3,3 \quad \dots \quad (10),$$

где ω_k — живое сечение при критической глубине; B_k — ширина живого сечения при h_k ; $\alpha = 1,1$; $g = 9,81 \text{ м сек}^2$.

Задаваясь глубинами, определяем значения левой части равенства (10) и строим кривую

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = f(h_k) \quad \dots \quad (\text{рис. 3}).$$

Таблица 4

Определение критической глубины по формуле (10)

h_k	ω_k	ω_k^3	B_k	$\frac{\omega_k^3}{B_k}$
1,00	7,07	353	10	35,3
1,10	8,08	528	„	52,8
1,15	8,57	628	„	62,8

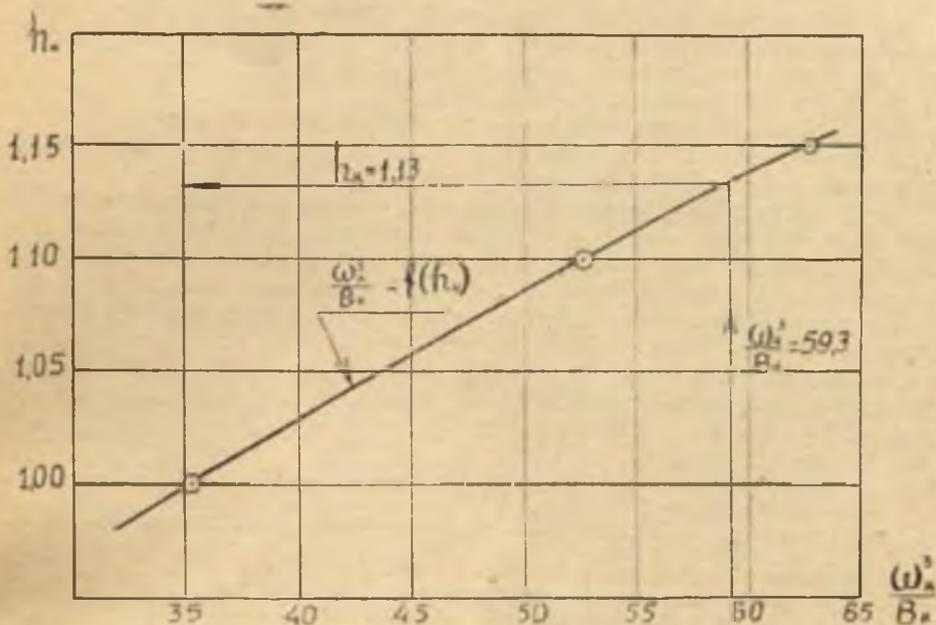


Рис. 3.

По кривой (рис. 3) для значения $\frac{\omega Q^2}{g} = 59,3$ определяем $h_k = 1,13$ м $> h_n = 1,06$ м. Глубина на пороге менее критической, поэтому в конце порога при сопряжении с плёсом может быть небольшой прыжок. Он должен быть затопленным, благодаря большим глубинам плесового участка. Для определения величин прыжка определяем сопряженную глубину h^* на нижнем плесе по формуле:

$$h^* = \frac{h_n}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8 h_k^3}{h_n^2}} - 1 \right) \dots \dots \dots (11)$$

Подставив в формулу (11) $h_n = 1,06$ и $h_k = 1,13$, получаем сопряженную глубину на нижнем плесе $h^* = 1,20$ м.

Таким образом, при наличии на плесе при прохождении паводка глубины более 1,20 м будем иметь затопленный прыжок высотой $1,20 - 1,06 = 0,14$ м, и, практически, при бурном течении на пороге он будет мало заметен. Скорости паводка, как показывает расчет (табл. 3), в средней части живого сечения достигают $v_2 = 3,60$ м/с, а в боковых частях $v_1 = 1,80$ м/с. При постепенности перехода эти скорости могут быть несколько выше в береговых частях и несколько ниже в средней части и таким образом не переходят допустимого предела для валунного русла.

В приведенном примере уклон порога взят $i = 0,03$. Как показывают исследовательские работы на порогах малых рек, уклоны на порогах редко превосходят указанный; чаще средний уклон порога менее 0,03, что облегчает расчет.

Второй вариант русловой мелиорации порога (рис. 1), как показывает гидравлический расчет, дает следующие технические преимущества по сравнению с устройством высоких береговых дамб:

- 1) понижение уровня воды при паводке;
- 2) уменьшение паводковой скорости течения воды на пороге;
- 3) более плавное сопряжение свободной поверхности воды порога с нижним плесовым участком.

Этот вариант представляет большую выгоду по сравнению с постройкой высоких дамб выше паводкового горизонта, благодаря экономии стройматериалов (леса, камня), рабочей и гужевой силы, тем более, что загрузка камнем ряжей большой емкости сопряжена с привозкой камня со стороны, а загрузка невысоких дамб (0,5 м) может быть выполнена камнем, заготовленным на месте строительства.

Настоящая статья является примером применения для практических расчетов исследований коэффициентов шероховатости, изменяющихся на порогах при малых глубинах (6, 9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахутин А. Н. Рабочая книга по специальному курсу гидравлики. ГНТИ, 1931.
2. Бахметев Б. А. Гидравлика. Л., 1934.
3. Егo же. О неравномерном движении жидкости в открытом русле. Л., 1932.
4. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. Гидрометиздат, 1946.
5. Горчин Н. К. и Чертоусов М. Д. Гидравлика в задачах. КУБУЧ, 1927.
6. Малявкин А. Н. О коэффициентах шероховатости порожистых участков сплавных рек. Гослестехиздат, 1932.
7. Егo же. Проектирование регулирующих сооружений на сплавных реках. Гослестехиздат, 1934.
8. Егo же. Геолого-гидрологический очерк Карелии и характеристика речного стока. Ученые записки К-ФГУ, т. I, 1947.
9. Егo же. Коэффициенты шероховатости порогов рек Карелии. Известия К-Ф Базы АН, № 4, 1948.
10. Павловский Н. Н. Курс гидравлики, ч. I. Л., 1924.
11. Егo же. Гидравлический справочник. Л., 1924.
12. Егo же. К вопросу о расчетной формуле для равномерного движения в водотоках с неоднородными стенками. Известия НИИГ, т. III, 1931.
13. Рахманов А. Н. О построении кривых свободной поверхности для естественных водотоков при установившемся движении. Л., 1930.
14. Чертоусов М. Д. Инженерная гидравлика. Главэнерго, 1934.