

УДК 502/504:627.131:532.51

Н.В. Арефьев, доктор техн. наук, профессор
М.А. Михалев, доктор техн. наук, профессор
О.С. Скворцова, канд. техн. наук, доцент

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
 «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

ОБЩИЙ РАЗМЫВ РУСЛА И ПониЖЕНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОХРАНИЛИЩНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Рассматривается алгоритм математического моделирования транспорта аллювиальных отложений и процесса деформации русла неравномерным потоком. Программа позволяет решить проблему общего размыва русла в нижнем бьефе гидротехнических сооружений.

A mathematical modeling technique for description of non-uniform flow, alluvium drifts transportation and soil multi-fraction particles effect on the bottom deformation is considered. By means of a program implemented on the model, a number of practical problems can be solved related to scours of channels of non-cohesive soils in the downstream zones of water works.

В нижнем бьефе гидроузлов наблюдаются два вида размывов русла: местный и общий. Местный размыв русла происходит за водосборными сооружениями, входящими в состав гидроузлов. Причины местного размыва: неполное гашение кинетической энергии воды в пределах водобоя и рисбермы, высокий уровень турбулентности потока, увеличение удельного расхода воды по сравнению с естественными условиями. Этот вид русловых деформаций не поддается строгому математическому описанию. Размеры воронки местного размыва можно вычислить на основании результатов физического моделирования явления в соответствии с требованиями теорий подобия и размерностей [1]. Если местный размыв затрагивает только часть русла реки, непосредственно примыкающую к рисберме водосборных сооружений, то общий размыв распространяется в русле ниже створа гидроузла на большое расстояние. На всем участке русла, подверженного общему размыву, наблюдаются понижения отметок дна и уровней воды. Это может повлечь за собой изменение режима сопряжения бьефов в самом гидроузле с катастрофическими последствиями, а также создать затруднения с отбором воды из реки на расположенных ниже по течению водозаборных сооружениях. Основная причина общего размыва русла — осадение наносов, перемещаемых водным потоком, в водохранилище гидроузла. Обладая способностью транспортировать речные наносы, поток стремится на-

брать их в нижнем бьефе в том количестве, которое он потерял в водохранилище. Следовательно, в нижнем бьефе наблюдается постоянный смыв наносов — их уносит вниз по течению, из-за чего отметки дна и уровней воды в реке понижаются.

Схема явления деформации русла в нижнем бьефе гидроузла представлена на рисунке. Здесь пунктирной линией изображено дно водотока до образования воронки местного размыва; глубина воронки обозначена z_p , длина — x_p . Через промежуток времени Δt после начала эксплуатации гидроузла на участке нижнего бьефа длиной $x + \Delta x$ произошел общий размыв русла. Свободная поверхность воды, которая до общего размыва русла занимала положение 1, вследствие понижения дна русла приняла положение 2. При этом уровень воды не-

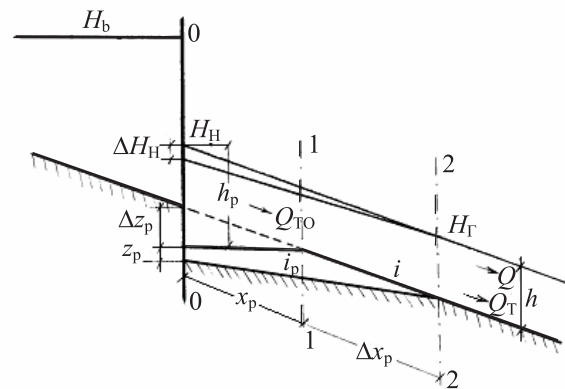


Схема общего размыва русла

посредственно у гидроузла понизился на величину ΔH_H . Вместе с понижением уровня воды произошло увеличение глубины воронки местного размыва на величину Δz_p .

Принято допущение: глубина воды в воронке местного размыва h_p остается постоянной: $h_p = h + z_p$, где h — глубина воды в русле до образования размывов. С учетом этого допущения следует, что дно воронки местного размыва понижается на такую величину, на которую происходит падение уровня воды вследствие общего размыва: $\Delta H_H = \Delta z_p$. Предполагается, что из верхнего бьефа в нижний поступает твердый расход: $Q_{ТО} > 0$. Ниже створа общего размыва 2–2 поток транспортирует наносы, расход которых равен Q_T , при этом выполняется условие: $Q_T > Q_{ТО}$. Следующее допущение: движение воды ниже этого створа равномерное; дно имеет постоянный уклон i , соответствующий средней линии дна на достаточно протяженном участке нижнего бьефа; в пределах общего размыва между створом гидроузла 0–0 и створом 2–2 дно прямолинейное, с уклоном i_p . Таким образом, объем призмы смытых наносов легко определить, исходя из его геометрических размеров. Зная объем наносов и расходы Q_T и $Q_{ТО}$, можно найти время Δt , за которое эти наносы унесены потоком.

Схема, изображенная на рисунке, является базовой, на каждом последующем этапе расчетов она вновь и вновь неоднократно повторяется. Приведем основные расчетные зависимости и алгоритм решения задачи. Заданы следующие величины: расход воды Q , проходящий через сооружения гидроузла из верхнего бьефа в нижний; кривая связи уровней и расходов воды $Q = f(H_H)$, позволяющая по расходу Q определять соответствующий уровень воды в нижнем бьефе H_H ; мутность воды (или расход наносов) $Q_{ТО}$, поступающей из водохранилища в нижний бьеф; протяженность воронки местного размыва русла x_p и глубина воды в ней h_p ; кривая гранулометрического состава грунтов, слагающих русло водотока; уклон дна водотока i и глубина воды в нем h . В естественных условиях ось x совпадает с дном водотока и направлена вниз по течению. На участке общего размыва на каждом этапе расчетов ось x совпадает с дном деформируемого русла (синус угла наклона оси к горизонтальной плоскости равен i_p) и тоже направлена вниз по течению. Глубину потока измеряют по

вертикали; гидравлический радиус определяют по формуле $R = \Omega/\chi$, где χ — смоченный периметр, Ω — площадь живого сечения, соответствующие расходу воды Q . В общем случае при неполном регулировании стока с помощью водохранилища расход воды, поступающей в нижний бьеф, является сложной функцией времени. В таком случае гидрограф реки заменяется «ступенчатой» кривой.

Алгоритм задачи — это несколько блоков, первый из которых — «Сопrotивление движению воды в русле реки». Следует иметь в виду, что деформации русла в зоне общего размыва русла определяют русловым процессом вне этой зоны. Унос определенной фракции наносов за пределы зоны общего размыва зависит от способности потока транспортировать эту фракцию в русле реки вне данной зоны. Это дает основание предполагать, что русловые формы в зоне размыва и в русле одинаковы. Русловой процесс — сложное природное явление, обладающее прямыми и обратными связями [2]. Прямая связь потока и русла, обычная для гидравлических задач, проявляется в том, что русло (его форма и шероховатость поверхности) создают в потоке определенное скоростное поле. Обратная связь заключается в том, что поток сам создает себе русло, которое отвечает его скоростному полю. Эта сложность находит свое отражение и в математическом описании явления: решение задачи может быть реализовано только методом последовательного приближения.

Если скорость потока U превышает неразмывающую скорость для частиц, слагающих ложе реки, то в нем появляются песчаные волны-гряды (рифели). Размеры этих русловых форм намного превышают размеры частиц грунта, поэтому сопротивление движению воды увеличивается, скорость течения уменьшается. В соответствии с [3] высоту гряд и рифелей h_T определяют по формуле

$$\frac{h_T}{R} = 3,5 \frac{(1 - U_{oc}/U)^{2/3}}{\lg R/d_c + 6}. \quad (1)$$

В формировании русловых форм участвуют все фракции грунтов, слагающих русло реки, поэтому d_c — средний диаметр наносов, U_{oc} — соответствующая этому размеру неразмывающая скорость потока. При этом

$$d_c = \sum_{i=1}^n \Delta P_i d_i,$$

где n — число интервалов, на которые разбивается вертикальная ось кривой гранулометрического состава грунтов; ΔP_i — вероятность попадания размера частиц d_i в i -й интервал.

Крутизну гряды определяют так:

$$\frac{h_\Gamma}{l_\Gamma} = 1,25 \frac{(1 - U_{oc} / U)^{5/3}}{\lg R / d_c + 6}, \quad (2)$$

где l_Γ — длина гряды.

Что касается крутизны рифелей, то она равна

$$h_\Gamma / l_\Gamma = 0,1. \quad (3)$$

Как показывают результаты исследований, гряды образуются в несвязном зернистом грунте, если выполняется условие $d_c > 0,25$ мм (при условии $d_c \leq 0,25$ мм в русле образуются рифели) [3]. Приведенные зависимости характеризуют среднестатистические размеры упомянутых русловых форм. При подобном строении дна коэффициент гидравлического трения λ_Γ определяют по формуле

$$\lambda_\Gamma = 0,205 \frac{h_\Gamma}{l_\Gamma} \left(\frac{h_\Gamma}{R} \right)^{0,25} + \lambda \left(1 - 10 \frac{h_\Gamma}{l_\Gamma} \right), \quad (4)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения поверхности гряды.

Высоту выступов шероховатости Δ , входящую в коэффициент гидравлического трения, определяют по размерам самых крупных частиц. В качестве таковых обычно принимают размер d_k , которому по кривой гранулометрического состава соответствует $P_k \approx 95$ %.

Если $d_k \leq 4$ мм, то $\Delta \approx d_k$; при условии 4 мм $< d_k \leq 8$ мм $\Delta \approx (0,8 \dots 1,0) d_k$; в случае, если 8 мм $< d_k \leq 20$ мм, $\Delta \approx (0,65 \dots 0,8) d_k$, и т.д. [4].

Для области квадратичного сопротивления коэффициент гидравлического трения находят из формулы

$$1/\sqrt{\lambda} = 4 \lg R / \Delta + 4,25. \quad (5)$$

В переходной области:

$$1/\sqrt{\lambda} = 4 \lg R / \Delta - 1,4 \lg Ar_\Delta + 11,28. \quad (6)$$

В области гидравлического гладкого русла коэффициент гидравлического трения является корнем уравнения:

$$\lambda - 0,0008 - \frac{0,0435 \lambda^{0,118}}{Ar_R} = 0. \quad (7)$$

В формулах (3)...(5) обозначено:

$$Ar_\Delta = \frac{g \Delta^3}{v^2} (\rho_1 / \rho - 1) \text{ и } Ar_R = \frac{g R^3}{v^2} (\rho_1 / \rho - 1),$$

где Ar_D и Ar_R — критерии Архимеда, в которых в качестве характерного размера приняты соответственно высота выступов шероховатости и гидравлический радиус потока; g — ускорение силы тяжести; v — кинематическая вязкость воды; ρ_1 и ρ — плотность материала грунта и воды соответственно.

В соответствии с [5] число Рейнольдса Re_{*c} , включающее динамическую скорость потока, отвечающую началу трогания частиц несвязного зернистого грунта U_{*c} , является функцией критерия Архимеда:

$$Re_{*c} = \frac{U_{*c} d_c}{v} = a Ar_c^n, \quad (8)$$

где $Ar_c = \frac{g d_c^3}{v^2} (\rho_1 / \rho - 1)$; параметры a и n зависят от области сопротивления.

В области квадратичного сопротивления, в которой $Ar_c \geq 1,6(10^4 \dots 10^5)$, $d_c \geq 1 \dots 2$ мм, $a = 0,162$, $n = 0,5$. Аналогичные зависимости для переходной области можно представить в таком виде: $2,4 \cdot 10^2 \leq Ar_c < 1,6(10^4 \dots 10^5)$, $0,25$ мм $\leq d_c < (1 \dots 2)$ мм, $a = 0,314$, $n = 0,432$. Для области гидравлически гладкого русла: $16 \leq Ar_c < 2,4 \cdot 10^2$, $0,1$ мм $\leq d_c < 0,25$ мм, $a = 0,502$, $n = 0,35$. Переход от динамической скорости к средней неразмывающей U_{oc} осуществляется с использованием формулы равномерного движения:

$$U_{oc} = U_{*c} \sqrt{2/\lambda_\Gamma}. \quad (9)$$

Если дно покрыто рифелями, то сопротивлением их поверхности пренебрегают, и формула (4) упрощается:

$$\lambda_\Gamma = 0,0205 (h_\Gamma / R)^{0,25}. \quad (10)$$

Как показывают исследования [3], гряды и рифели существуют в русле реки при условии $U_{oc} < U \leq 3U_{oc}$. Если скорость течения U превышает неразмывающую U_{oc} больше чем в три раза, наносы из состояния донного влечения переходят в состояние полного взвешивания, начинают перемещаться в толще потока, а рифели и гряды на дне исчезают. В этом случае сопротивление движению оказывают выступы, шероховатости, соответствующие размеру частиц наносов, и коэффициент гидравлического трения определяют по формулам (5)...(7). Следовательно, сопротивление движению воды вследствие такого перехода может существенно уменьшиться, а скорость течения увеличиться.

Для решения задачи в блоке «Сопротивление движению воды в русле реки» авторы предлагают следующий алгоритм.

Первый шаг: задают отношение U/U_{oc} в пределах $1,0 < U/U_{oc} < 3,0$. Далее по формулам (1)...(3) находят высоту и крутизну гряды (рифеля). После этого из зависимостей (4) и (10) определяют коэффициент гидравлического трения этих русловых образований; в случае грядового строения дна дополнительно используют зависимости (5)...(7). Из формулы (8) определяют динамическую скорость потока U_{*o} , отвечающую началу трогания частиц размером d_c . Используя зависимость (9), находят среднюю неразмывающую скорость потока U_{oc} для частиц грунта этой крупности. В связи с тем что средняя скорость потока задана, следует найти отношение U/U_{oc} и сравнить его со значением, принятым в начале расчетов. В случае необходимости расчеты повторяют до тех пор, пока методом последовательных приближений не будет достигнута требуемая точность. Если в процессе расчетов окажется, что отношение U/U_{oc} станет больше трех, то коэффициент гидравлического трения принимают по формулам (5)...(7). Естественно, что в этом случае процесс итераций становится ненужным.

Следующий блок «Неравномерное движение» относится к участку русла реки в нижнем бьефе гидроузла, подверженному общему размыву. Основная цель расчетов в этом блоке — найти понижение отметки дна Δz_p и уровня воды ΔH_H непосредственно у сооружений. Благодаря принятому условию $\Delta H_H = \Delta z_p$ достаточно определить понижение уровня воды, используя для этой цели уравнение неравномерного движения [6]:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_p - i_f}{1 - Fr^2} = \varphi(h),$$

где $i_f = U^2/C^2R = \lambda_\Gamma(U^2/2gR)$ — уклон трения; $Fr = Q^2B/g\Omega^3$ — число Фруда; B — ширина русла; $C = \sqrt{2g/\lambda_\Gamma}$ — коэффициент Шези.

После несложных преобразований можно установить связь между уклоном дна на участке общего размыва и уклоном дна реки:

$$i_p = i - \frac{z_p + \Delta z_p}{x + \Delta x}.$$

Алгоритм решения задачи в этом блоке следующий. Вначале устанавливают величину расстояния Δx , на которое общий размыв распространяется вниз по

течению реки, а также величину понижения уровня воды в нижнем бьефе непосредственно у сооружений ΔH_H (следовательно, и величину понижения дна Δz_p). В последующих расчетах величина Δx остается неизменной. Решая уравнение неравномерного движения, в котором параметры потока заданы в створе 2–2, находят эти параметры в створе 0–0, в том числе и уровень воды в нем, а также величину понижения уровня воды (последнюю сравнивают с принятой в начале расчетов). Расчет продолжается методом итераций до тех пор, пока принятое в начале понижение уровня воды не совпадает с полученным в конце расчетов. После этого можно найти объем смытого материала ΔW как сумму площадей двух треугольников, умноженную на смоченный периметр русла:

$$\Delta W \approx 0,5\chi \left| \Delta z_p x_p + \Delta x (z_p + \Delta z_p) \right|.$$

Далее следует блок «Общий размыв русла». Как было отмечено выше, возможность деформации русла на участке общего размыва определяется транспортирующей способностью потока ниже по течению вне этого участка. В соответствии с заданной кривой гранулометрического состава грунтов в русле реки следует определить следующие размеры: наносов d_o , которые при известной скорости потока U перемещаться не будут (для них эта скорость является неразмывающей); частиц d_b , перемещающихся при этой скорости потока в состоянии полного взвешивания (скорость потока для этих частиц в три раза превышает неразмывающую скорость).

Для определения размера d_o принимаем условие: $U = U_o$, где U_o — неразмывающая скорость потока, соответствующая этой крупности частиц грунта. Тогда из зависимости (9) найдем динамическую скорость потока U_{*o} , отвечающую началу трогания этих частиц:

$$U_{*o} = U \sqrt{\lambda_\Gamma/2}.$$

Воспользуемся теперь формулой (8) для определения величины d_o :

$$U_{*o} = a Ar_o^n v / d_o,$$

$$\text{где } Ar_o = \frac{gd_o^3}{v^2} (\rho_1/\rho - 1).$$

Аналогичным образом поступаем для определения размера частиц d_b :

$$U_{*b} = 3U \sqrt{\lambda_\Gamma / 2},$$

$$U_{*b} = a Ar_b^n v / d_b,$$

где U_{*b} — динамическая скорость потока, отвечающая началу трогания частиц размером d_b ,

$$Ar_b = \frac{gd_b^3}{\nu^2} (\rho_1 / \rho - 1).$$

Зная размеры частиц d_o и d_b , найдем соответствующие им вероятности P_o и P_b . Таким образом, все наносы, слагающие ложе реки, разделены на три категории: первая — это наносы таких размеров, которые при заданной кинематике потока не перемещаются, им отвечает условие $d \geq d_o$; вторую категорию представляют фракции, перемещаемые в состоянии влечения по дну (в грядах или рифелях), им соответствуют размеры частиц $d_b \leq d < d_o$; третья категория — это наносы, перемещающиеся в толще потока в состоянии полного взвешивания. Каждой категории соответствует своя расчетная формула для определения твердого расхода. Так, для расхода донных наносов в плотном теле (m^3/c) в [7] предложена следующая формула:

$$Q_{TO} = 0,015(U/U_o)^3(1 - U_o/U)dU\chi,$$

где U_o — неразмывающая скорость для практически однородных грунтов, размер которых мало отличается от среднего диаметра.

В [7] для расхода взвешенных наносов в плотном теле (m^3/c) предложена следующая формула:

$$Q_{TB} = 0,000023(U/\omega)^4(d/R)^{1,6}Q,$$

где ω — гидравлическая крупность наносов, геометрический размер которых равен d .

Для определения гидравлической крупности этих частиц можно рекомендовать зависимость [5]:

$$Re_\omega = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{Ar_d}{18 + 0,61Ar_d^{0,5}}.$$

Общий расход перемещаемых потоком наносов

$$Q_T = Q_{TO} + Q_{TB}.$$

Последний блок называется «Время деформаций», которое определяется как частное от деления объема деформаций на расход наносов.

Ключевые слова: водохранилище, водосливная плотина, нижний бьеф, общий размыв русла, несвязный грунт, неразмывающая скорость потока, незаилляющая скорость потока, транспортирующая способность потока, гряды, рифели, коэффициент гидравлического трения, понижение уровней дна и воды, критерии подобия: Рейнольдса, Фруда, Архимеда.

Список литературы

1. **Mikhalev, M. A.** Physical Modelling of Channel Processes in Lower Pools of Spillway Dams [Текст] / М. А. Михалев // Proceedings of the International Symposium. — Vol. I. — St. Petersburg, 1994. — P. 201–208.
2. **Михалев, М. А.** О моделировании руслового процесса [Текст] / М. А. Михалев // Водные ресурсы. — 1989. — № 6. — С. 173–176.
3. **Кнороз, В. С.** Влияние макрошероховатости русла на его сопротивление [Текст] / В. С. Кнороз // Известия ВНИИГ. — Т. 62. — 1959. — С. 54–75.
4. **Кнороз, В. С.** Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие [Текст] / В. С. Кнороз // Известия ВНИИГ. — Т. 59. — 1958. — С. 62–81.
5. **Михалев, М. А.** Материалы по моделированию некоторых видов движения вязкой жидкости [Текст] / М. А. Михалев // Известия ВНИИГ. — Т. 108. — 1975. — С. 27–39.
6. **Гришанин, К. В.** Динамика русловых потоков [Текст] / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 411 с.
7. **Арефьев, Н. В.** Программный комплекс расчета неустановившегося движения воды в разветвленной сети каналов [Текст]: методические указания / Н. В. Арефьев. — Л.: Изд-во ЛГТУ, 1991. — 57 с.