Транспортирующая способность потока при развитом транспорте наносов

Богославчик П.М.
(БГПА)

В динамике русловых потоков имеется много формул расхода твердого стока, которые в соответствии с характером перемещения частиц грунта в потоке подразделяются в основном на два типа: формулы расхода донных (влекомых) наносов и формулы расхода взвешенных наносов. Удельный расход твердого стока равен произведению концентрации грунта в потоке (мутности) на удельный расход воды

$$q_S = S \cdot q \qquad (1)$$

Средняя концентрация твердого стока в потоке зависит от следующих величин: плотности воды и частиц грунта ρ и ρ_S, гравитационного ускорения g, вязкости воды μ, гранулометрического состава транспортируемого грунта (в большинстве случаев обходятся средним диаметром частиц d), динамической скоростью υ_*. То есть

$$S = f(\rho, \rho_S, g, \mu, d, \upsilon_*) \qquad (2)$$

Некоторые авторы, в частности Гришанин К.В. отмечают, что в области развитого транспорта наносов, то есть при скоростях, значительно превышающих не размывающие, картина транспорта твердого стока значительно упрощается. Здесь, независимо от диаметра частиц вязкого подслоя на дне нет, и, следовательно, вязкость воды влияет на процесс размыва лишь в той мере, в какой она влияет на гидравлическую крупность частиц грунта. То же самое можно сказать о величинах ρ_S, g, d. Эти параметры вместе определяют гидравлическую крупность w. Кроме того, поскольку в гидравлических расчетах оперировать динамической скоростью сложно, введем в (2) вместо υ_* определяющие ее величины: среднюю скорость потока u, глубину потока h и диаметр частиц грунта d как характеристику шероховатости песчаного дна. Таким образом, уравнение (2) можно преобразовать к следующему виду

$$S = f(u, w, h, d). \qquad (3)$$

Расход твердого стока

$$q_S = q \cdot f(u, w, h, d). \qquad (4)$$

В динамике русловых потоков известно достаточно много формул расхода твердого стока, которые в большинстве своем в том или ином виде содержат аргументы, фигурирующие в (4). Более того, формулы расхода взвешенных наносов несмотря на их большое количество разнообразием не отличаются и большинство из них приводится к следующему виду

$$q_S = D \frac{u^{\alpha}}{w^k h^m} q, \qquad (5)$$

где величины D, α, k, m у разных авторов предлагаются разными по величине в зависимости от условий получения экспериментальных данных.

Исследования размыва грунтов вызывает серьезные трудности по причине сложности проведения экспериментов. Проводимые ранее опыты по размыву плотин позволили получить данные именно для условий размыва при больших скоростях, т.е. для развитого транспорта наносов. Для условий размыва низового откоса плотины из песчаных грунтов была предложена следующая формула

$$q = 0{,}153 \cdot \frac{u^3}{h} q. \qquad (6)$$

Попытка расширить область применения формулы (6) на другие условия размыва успешными не были. Более того, даже для расчета размыва плотины при переливе для второй стадии применялась формула В.Н.Гончарова, так как формула (6) дает плохую сходимость с экспериментальными данными.

С целью уточнения формулы расхода твердого стока при больших скоростях рассмотрим более подробно размыв грунтовой плотины на второй стадии, для которой характерно интенсивное снижение гребня. На рис.1 представлена физическая картина размыва грунтового массива. На рис.2 – графики размыва для песчаных грунтов различного гранулометрического состава.

Ранее отмечалось, что при переливе воды через гребень плотины сначала происходит размыв низового откоса (первая стадия). После полного размыва низовой упорной призмы размываемый массив приобретает форму водослива практического профиля (рис.1). Затем начинается интенсивное снижение гребня водослива, который при этом сохраняет форму близкую к практическому профилю. Для определения размывающей способности потока (интенсивности снижения гребня) сделаем допущение, что поток находится в состоянии динамического равновесия, то есть насыщение его наносами в каждом сечении соответствует транспортирующей способности. Выделим на гребне размываемого водослива в его наивысшей точке участок предельно малой длины x и рассмотрим деформацию гребня на нем, применив балансовый метод. Воспользуемся уравнением деформации, которое для плоской задачи имеет следующий вид

$$\frac{\partial q_S}{\partial x} + \rho_0 \frac{dy}{dt} = 0, \qquad (7)$$

где ρ_0 — плотность грунта;

y — отметка гребня размываемого массива.

Отсюда, размывающая способность потока не гребне

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial q_S}{\partial x} \qquad (8)$$

В зависимости от того, какая формула расхода твердого стока подставляется в уравнение (8), получается соответствующее уравнение размывающей способности. Опытные данные (рис.2) дают несколько неожиданные результаты. Во всех опытах независимо от крупности частиц размываемого грунта, от глубины и скорости потока интенсивность снижения гребня до момента подтопления размываемого водослива со стороны нижнего бьефа. Получается, что размывающая способность потока зависит от фактора, который во всех опытах в рассматриваемом интервале времени одинаков. Как известно, на гребне водослива практического профиля в его наивысшей точке устанавливается критическая или близкая к ней глубина, то есть глубина с числом Фруда $Fr = u^2 / gh = 1$. Число Фруда остается постоянным весь рассматриваемый период времени. Поэтому можно предположить, что фактором, определяющим размывающую способность потока, является число Фруда, и уравнение размывающей способности можно записать

$$\frac{dy}{dt} = -a\left(\frac{u^2}{gh}\right)^{\delta}. \qquad (9)$$

Исходя из (8) и (9), а также имея ввиду, что в рассматриваемом случае $dy/dx=const$, и для условий плоской задачи $\upsilon = q/h$, после некоторых преобразований имеем

$$q_S = k\frac{\upsilon^{2\delta-1}}{h^{\delta}}q. \qquad (10)$$

По опытным данным коэффициент k колеблется в пределах 0,004 – 0,005 (в среднем 0,0045). По анализу второй стадии размыва коэффициент δ определить невозможно, так как здесь $Fr=1$. Поэтому для определения δ были выполнены расчеты размыва плотин для первой стадии по предложенной ранее методике, но с использованием формул (10). При этом уравнение деформации для первой стадии имеет вид

$$\frac{dM}{dt} = k_1(z-y)^{0,3\delta+0,9}, \qquad (11)$$

где

$$k_1 = \frac{ki^{0,9\delta-0,3}m^{0,2\delta+0,6}(2g)^{0,1\delta+0,3}}{n^{1,8\delta-0,6}},$$

i – уклон дня низового откоса;

z – уровень верхнего бьефа;

m – коэффициент расхода размываемого водослива;

n – коэффициент шероховатости.

На основании анализа опытных данных и сравнения их с расчетными для моделей из песчаных грунтов различного гранулометрического состава установлено значение величины показателя степени. Оно равно $\delta=2,15$. Тогда формула транспортирующей способности потока имеет вид

$$q_S = 0,0045\frac{\upsilon^{3,3}}{h^{2,15}}q. \qquad (12)$$

Таким образом получена формула расхода твердого стока для области развитого транспорта наносов. Формула дает одинаково хорошую сходимость при расчетах размыва плотин при переливе как на низовом откосе, так и на гребне. Предполагается, что формула (12) может быть применена и в других случаях для бурных потоков, например для расчетов размывов в нижних бьефах водосбросов, где также имеет место развитой транспорт наносов. Но для подтверждения этого предположения требуются дополнительные исследования.

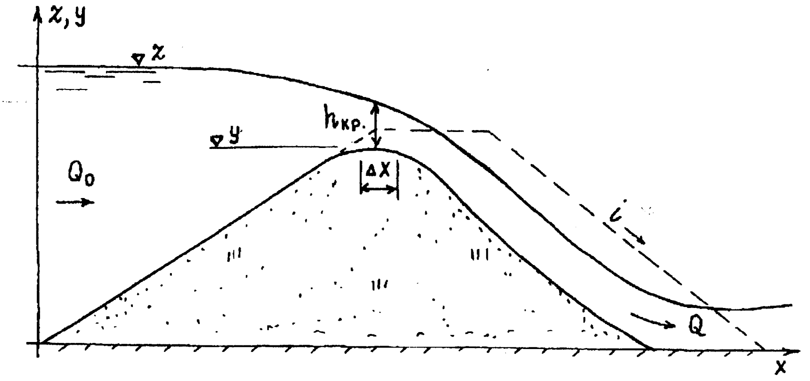

Рис.1. Общая картина размыва.

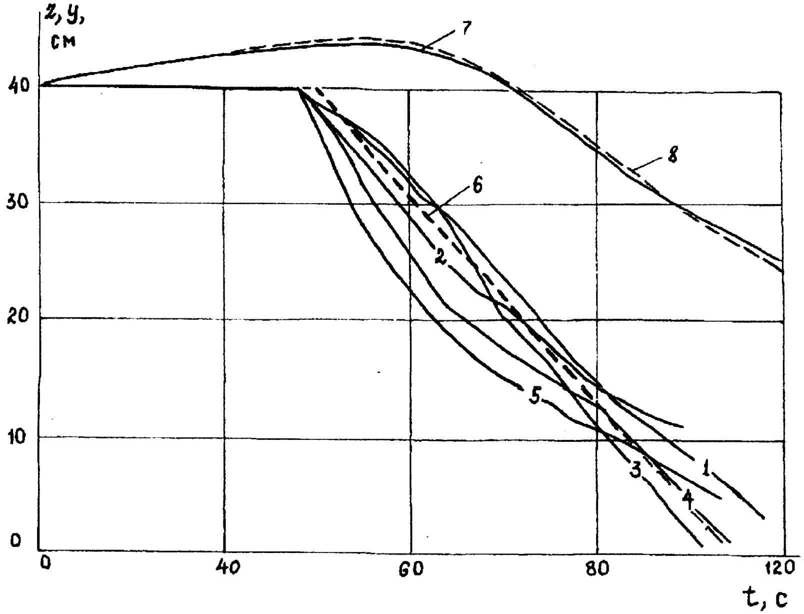

Рис.2. Графики размывающей способности y=f(t) для песчаных грунтов различной крупности: 1 и 4 – для d=0,1-1,0 мм; 2 – d=0,1-2,0 мм; 3 – d=0,1-0,5 мм; 5 – d=12 мм; 6 – расчетный для d=0,1-1,0 мм; 7 – график изменения УВБ для кривой 1; 8 – то же расчетный для кривой 6.