

международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Инженерно-строительный институт. В 3 ч. Ч. 1. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 308 с.

4. Качановский, Б. Д. Гидравлика судоходных шлюзов / Б. Д. Качановский. – М.–Л.: Речиздат, 1951. – 271 с.

УДК 627.824

Уклоны свободной поверхности потока на гребне размываемой плотины

Богославчик П. М., Рам Бабу Прасад
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

На основании экспериментальных исследований подтверждена гипотеза о линейном изменении уклонов свободной поверхности потока для случая размыва однородных плотин из песчаных грунтов. Получены численные значения положения начала координат кривой спада относительно гребня размываемого водослива.

Ранее было установлено [1], что интенсивное снижение отметки гребня плотины под воздействием переливающегося потока происходит после полного размыва низовой призмы. Профиль размываемой плотины на этой стадии размыва приобретает форму, близкую к форме водослива практического профиля (рис.).

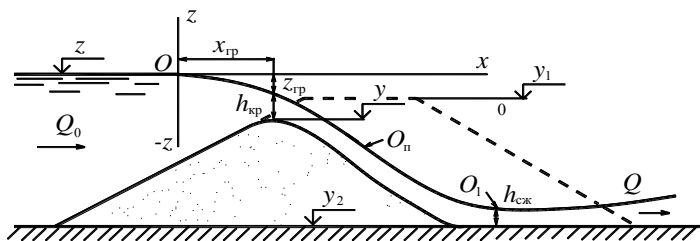


Рис. Схема истечения через размываемую плотину

Из уравнения деформации [2] размывающая способность потока на этой стадии

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{dq_s}{dx} \quad (1)$$

Удельный весовой расход твердого стока можно представить следующей зависимостью

$$q_s = q \cdot f(u, w, h, d), \quad (2)$$

где q – удельный расход воды, м³/с на 1 м ширины потока; u – средняя скорость потока, м/с; w – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с; h – глубина потока, м; d – диаметр частиц размываемого грунта, м.

Диаметр частиц размываемого грунта d и их гидравлическая крупность для конкретного случая являются величинами постоянными. Удельный расход воды, средняя скорость потока и его глубина являются величинами взаимосвязанными, а именно: $q = u \cdot h$. С учетом этого и на основе анализа известных из речной гидравлики формул удельный весовой расход твердого стока можно представить следующей зависимостью

$$q_s = Aq^a h^b, \quad (3)$$

где A – коэффициент, величина которого зависит от физико-механических характеристик размываемого грунта; a и b – показатели степеней, значения которых у разных авторов имеют различные значения.

Подставляя (3) в (1), получаем

$$\frac{dy}{dt} = -Dq^x h^{y+1} \frac{dh}{dx} \quad (4)$$

Для решения данного уравнения необходимо знать закон изменения глубины потока на гребне размываемого водослива по продольной координате dh/dx . Так как дно размываемого водослива в рассматриваемом сечении на гребне горизонтальное, принимаем $dh/dx = dz/dx$, где z – ордината кривой свободной поверхности потока.

Как отмечалось выше, гидравлическая картина размыва на второй стадии похожа на истечение через водослив практического профиля. Для такой картины уклоны свободной поверхности по длине возрастают, достигая в некоторой точке перегиба O_n максимума, затем уменьшаются до точки в сжатом сечении O_1 . Образуются две ветви OO_n и $O_n O_1$ [3], [4]. Для рассматриваемой задачи интерес представляет первая ветвь. Изменение уклона свободной поверхности потока для кривой OO_n выражается линейной зависимостью. В представленной системе координат это изменение выражается следующим образом

$$\frac{dz}{dx} = -K \frac{x}{g}, \quad (5)$$

где K – константа, имеющая размерность [1/Т²].

Из уравнения (5)

$$z = -K \frac{x^2}{2g}, \quad (6)$$

откуда

$$K = \frac{2gz}{x^2}. \quad (7)$$

На гребне размываемой плотины устанавливается глубина, равная критической, т.е.

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \quad (8)$$

Приняв коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,0$ и выразив удельный расход формулой $q = m\sqrt{2g}(z - y)^{1,5}$, где m – коэффициент расхода, получим

$$h_{\text{кр}} = 1,26m^{2/3}(z - y). \quad (9)$$

Падение кривой свободной поверхности в сечении на гребне

$$z_{\text{гр}} = (z - y) - h_{\text{кр}} = (z - y)(1 - 1,26m^{2/3}). \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (6) $x = x_{\text{гр}}$ и $z = z_{\text{гр}}$, получим выражение для определения константы K

$$K = \frac{2gz_{\text{гр}}}{x_{\text{гр}}^2}. \quad (11)$$

Обозначим относительное расстояние от точки O (начало кривой падения) до гребня $\beta = x_{\text{гр}} / z_{\text{гр}}$, тогда формулу (11) с учетом (10) можно записать

$$K = \frac{2g(1 - 1,26m^{2/3})}{\beta^2(z - y)}. \quad (12)$$

С целью определения величины β были обработаны результаты лабораторных исследований, проведенных на моделях плотин из песчаных грунтов различного гранулометрического состава. Модели отсыпались в лотке шириной 0,1 и 0,32 м. Размеры моделей были следующие: высота 0,4 м, ширина по гребню 0,2–0,4 м, заложение откосов 1:1,5 – 1:3,0. Проведен ряд серий опытов: для грунтов крупностью 0,25–0,5 мм ($d_{\text{cp}} = 0,35$ мм), 0,1–1,0 мм ($d_{\text{cp}} = 0,25$ мм), 0,5–1,0 мм ($d_{\text{cp}} = 0,70$ мм) и 1,0–2,0 мм ($d_{\text{cp}} = 1,25$ мм). Процесс размыва в опытах фотографировался с расстояния 2,5 м через небольшие интервалы времени. Для каждого опыта было получено до 10–15 мгновенных профилей плотины с кривой свободной поверхности. Фотосъемка велась через стеклянную стенку лотка, на которой была нанесена масштабная сетка. Таким образом, были получены отпечатки профилей свободной поверхности

потока и очертания размываемого массива грунта в каждый фиксированный момент времени. Положение начала координат O подбиралось последовательным приближением таким образом, чтобы для всех координат кривой OO_n величина z , подсчитанная по формуле (7), принимала одинаковые значения. Во всех опытах во все фиксированные моменты времени такое положение начала координат было найдено. Это означает, что в любой момент размыва на кривой свободной поверхности имеется точка, начиная с которой уклон свободной поверхности изменяется по линейному закону. Иначе говоря, подтверждается справедливость формулы (5) для рассматриваемого случая.

Для каждого полученного профиля была определена относительная величина расстояния точки O до гребня плотины β . Установлено, что в каждом опыте для каждого фиксированного момента времени численные значения величины β колеблются в сравнительно небольших пределах, причем прослеживается зависимость этой величины от крупности размываемого грунта, а именно: с увеличением крупности частиц грунта расстояние точки O от гребня увеличивается. В результате обработки экспериментальных данных получены следующие значения величины β для грунтов с различной крупностью частиц:

$$d = 0,1-1,0 \text{ мм} (d_{cp} = 0,25 \text{ мм}), \quad \beta = 1,473;$$

$$d = 0,25-0,5 \text{ мм} (d_{cp} = 0,35 \text{ мм}), \quad \beta = 1,635;$$

$$d = 0,5-1,0 \text{ мм} (d_{cp} = 0,70 \text{ мм}), \quad \beta = 2,116;$$

$$d = 1,0-2,0 \text{ мм} (d_{cp} = 1,25 \text{ мм}), \quad \beta = 2,241.$$

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что гипотеза о линейном изменении уклонов свободной поверхности потока справедлива для случая размыва однородных плотин из песчаных грунтов. Получены численные значения положения начала координат кривой спада относительно гребня размываемого водослива.

Литература

1. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. – № 4. – С. 292–296.
2. Леви, И. И. Динамика русловых потоков / И. И. Леви. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 342 с.
3. Ляпин, А. Н. О построении кривых свободной поверхности на участках водопада / Гидротехническое строительство, 1975, № 11. – С. 22–24.
4. Серопян, К. Г. Результаты исследования размыва моделей дамб из несвязных грунтов в условиях плоской задачи / В сб. «Водозаборные и водопропускные сооружения». Труды института ВОДГЕО. – М., 1981. – С. 88–98.