

О моделировании местного размыва русла за водосбросными плотинами

Д.т.н., профессор М. А. Михалев,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Ключевые слова: водосливная плотина; русловой процесс; несвязный грунт; методы теории подобия и размерностей; критериальные уравнения; критерий Фруда; критерий Архимеда; критерий Рейнольдса; глубина местного размыва; модель; прототип

Проблема местного размыва русла у различных типов гидротехнических сооружений остается актуальной. Об этом, в частности, было сказано на 2-й конференции по размыву и эрозии (ICSE-2), которая прошла в 2004 году в Сингапуре, а также на 10-м Международном симпозиуме по речным наносам, состоявшемся в МГУ в августе 2007 года. Опубликованные доклады свидетельствуют о том, что к началу XXI века существенного прогресса в проблеме физического моделирования сложного явления взаимодействия гидротехнических сооружений с потоком и руслом достигнуто не было. Авторы работ, выполняя исследования на моделях сооружений, не оценивают условия и возможности моделирования; не уделяют должного внимания анализу явления; не задумываются о том, каким образом результаты, полученные на модели, можно пересчитывать в натурные условия; не используют достижения теории физического моделирования [1–8].

Современное положение дел убедительно проиллюстрировано в докладе членов американской делегации на конференции ICSE-2 [9] о местных размывах русла у мостовых переходов. В нем приводятся примеры крупных аварий, которые произошли в конце прошлого века в США на мостовых переходах вследствие подмыва опор и береговых устоев. Очевидно, многочисленные исследования местного размыва русла у подобного рода сооружений, проводимые в лабораторных условиях, не отражают тех процессов, которые происходят в натуре.

Опираясь на результаты работ [1–8], рассмотрим проблему физического моделирования местного размыва русла в несвязных грунтах за водосливными плотинами водохранилищных гидроузлов. При этом в качестве основы анализа будем использовать работу [8], расширяя и углубляя предложенную методику физического моделирования гидравлических явлений.

На рисунке 1 дана схема водосливной плотины 1 с водобоем 2, представляющим собой массивную бетонную плиту, длина которой обычно назначается равной размерам вальца гидравлического прыжка 3. За плитой водобоя размещаются плиты рисбермы 4, толщина которых постепенно уменьшается вниз по течению. В сумме длины водобоя и рисбермы равны протяженности крепления русла реки за водосливной плотинной l_k с помощью бетонных плит. Рисберма заканчивается концевым креплением в виде шпунтовой стенки 5, как показано на рисунке, либо в виде призмы из крупного камня, которая защищает концевую часть рисбермы от подмыва потоком, обладающим высоким уровнем турбулентности. Глубина забивки шпунта должна быть не меньше глубины z_p воронки местного размыва 6.

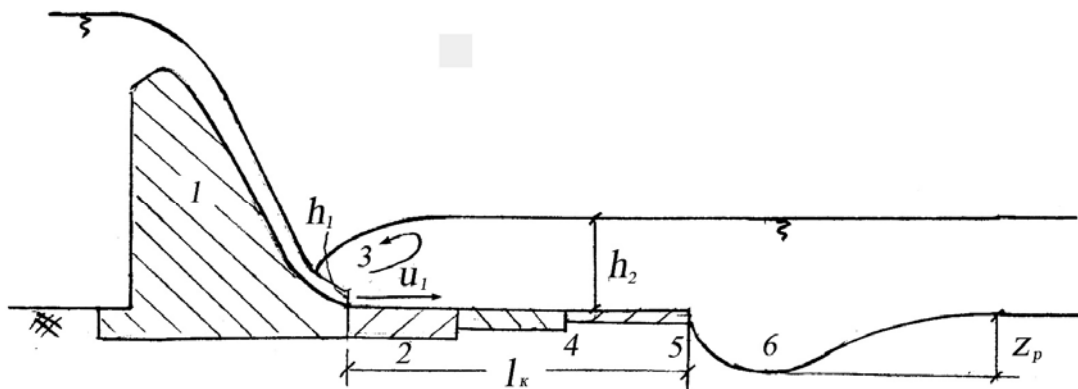


Рисунок 1. Схема водосливной плотины с водобоем

Существуют, по крайней мере, две причины образования местного размыва русла за водосбросными сооружениями. Первая – стеснение естественного русла реки сооружениями, входящими в состав гидроузла (в русле, помимо водосливной, может находиться глухая плотина, здание ГЭС и т.п.). По этой причине удельные расходы воды в нижнем бьефе за водосливной плотиной могут превышать удельные расходы воды в естественном состоянии реки в створе гидроузла.

Вторая причина – высокая степень турбулентности сбрасываемого через водослив потока, источником которой является гидравлический прыжок. Вследствие диссипации (рассеяния) энергии – перехода кинетической энергии турбулентных вихрей при их столкновении в теплоту – турбулентность потока постепенно уменьшается вниз по течению, достигая на большом удалении от створа гидроузла уровня, характерного для речного потока в естественном состоянии. Следовательно, глубина воронки местного размыва вниз по течению уменьшается. Наоборот, чем ближе расстояние к источнику турбулентности (чем короче длина крепления), тем больше глубина воронки местного размыва.

Значит, выбор оптимальной длины крепления можно сделать в рамках задачи поиска экономически обоснованного решения. Действительно: чем короче крепление (меньше его стоимость), тем больше глубина воронки размыва, тем глубже придется забивать шпунт (стоимость шпунтовой стенки увеличивается). И наоборот: чем длиннее крепление (больше его стоимость), тем меньше глубина воронки размыва, меньше глубина погружения шпунта (стоимость его уменьшается). Отсюда следует существование оптимальной длины крепления, при которой его стоимость и стоимость шпунтовой стенки будут минимальными. Задача будет решена, если найти метод определения глубины воронки местного размыва.

В настоящее время не существует математических методов решения этой задачи. Метод аналогий, как правило, не всегда можно реализовать, поскольку каждое гидротехническое сооружение уникально. Остается поиск решения с помощью метода физического моделирования [10–13], который требует обоснования.

Прежде всего, необходимо проанализировать явления в пределах длины крепления русла за водосливной плотиной: гидравлический прыжок, послепрыжковый участок, воронка местного размыва. Гидравлический прыжок довольно хорошо изучен методами математического и физического моделирования [14]. В соответствии с ними это явление в основном определяется числом Фруда в сжатом сечении и коэффициентом затопления гидравлического прыжка. Существует мнение, что параметры гидравлического прыжка должны зависеть от степени насыщения воды пузырьками воздуха – аэрации. Есть две причины аэрации гидравлического прыжка. Первая – аэрация струи воды в пределах водосливной грани плотины из-за выхода границы турбулентного пограничного слоя на поверхность струи. Пограничный слой зарождается на гребне плотины как ламинарный, который переходит ниже по течению в турбулентный. Турбулизация струи способствует захвату воздуха и ее аэрации. Естественно, на модели водослива из-за ее малых размеров этот вид аэрации не возникает (полагают, что такая аэрация не моделируется). Другая причина аэрации – заземление воздуха в месте зарождения вальца гидравлического прыжка (в сечении, практически совпадающем со сжатым). В некоторой степени этот вид аэрации прыжка исследуется методом физического моделирования. Следует заметить, что основные параметры гидравлического прыжка были определены в результате физического моделирования. Сравнение этих данных с результатами натуральных наблюдений и математических расчетов не обнаруживает существенных отклонений, которые можно было бы объяснить влиянием аэрации водного потока.

Существует еще один параметр, который, как показывают результаты математического моделирования [15] и экспериментов на физических моделях [16], оказывает существенное влияние на такие параметры прыжка, как высота и протяженность вальца – это коэффициент гидравлического трения (или число Эйлера). Но коэффициент гидравлического трения в пределах гидравлического прыжка не является характерной величиной, так как его величина изменяется в зависимости от расстояния от сжатого сечения. В качестве характерного коэффициента гидравлического трения следует принимать его величину в конце рисбермы, где уровень турбулентности потока мало отличается от уровня в естественном состоянии.

Таким образом, оценить влияние гидравлического прыжка на процесс образования воронки местного размыва можно с помощью критериев, определяющих параметры прыжка. К ним относятся:

- коэффициент гидравлического трения λ ;
- число Фруда в сжатом сечении $Fr_1 = u_1^2 / gh_1$, где u_1 и h_1 – скорость течения и глубина воды в сжатом сечении (см. рис. 1);
- коэффициент затопления гидравлического прыжка $n_3 = h_2 / h''$, где h_2 – глубина воды в нижнем бьефе в пределах рисбермы, h'' – вторая сопряженная глубина гидравлического прыжка (в качестве первой сопряженной глубины принимается глубина потока в сжатом сечении: $h' = h_1$).

В пределах послепрыжкового участка течение воды можно считать равномерным, но с особенностью: уровень турбулентности в потоке переменный – максимальный сразу за гидравлическим прыжком и минимальный в конце рисбермы. Как следует из работы [1], равномерное установившееся движение ньютоновской жидкости определяется тремя числами подобия: Фруда, Рейнольдса и Эйлера. Но условие равномерного движения потока в целом позволяет освободиться от числа Фруда, тогда число Эйлера (коэффициент гидравлического трения) будет функцией от критерия Рейнольдса и относительной шероховатости бетонной поверхности крепления. Кроме того, длина крепления играет здесь двоякую роль: с одной стороны, она выступает в качестве величины, характеризующей геометрию крепления, с другой – определяет уровень турбулентности потока в конце рисбермы. Таким образом, послепрыжковый участок вносит свою лепту в явление местного размыва. Прежде всего, это влияние критерия Рейнольдса $Re = h_2 u_2 / \nu = q / \nu$, где u_2 и q – скорость течения и удельный расход воды в пределах крепления русла, ν – коэффициент кинематической вязкости воды. Далее следует перечислить такие параметры: безразмерная длина крепления l_k / h_2 (можно отнести к глубине h_1); относительная шероховатость бетонной поверхности Δ / h_2 (Δ – абсолютная величина выступов шероховатости); коэффициент гидравлического трения λ . Если учесть, что влияние коэффициента гидравлического трения на процесс местного размыва было обнаружено в пределах гидравлического прыжка, то в пределах крепления появляется возможность оценить его, используя критериальное уравнение $\lambda = f(Re, \Delta / h_2)$. С учетом этого вывода можно сказать, что влияние послепрыжкового участка на процесс местного размыва определяется относительной длиной крепления l_k / h_2 . Далее необходим анализ явлений, происходящих в самой воронке местного размыва.

В связи с тем, что размыв грунта происходит при скорости потока, большей неразмывающей, явление размыва грунта должно зависеть от отношения средней скорости в пределах крепления русла u_2 к соответствующей неразмывающей u_0 в том месте, где поток покидает крепление и переходит в естественное русло реки. Отношение u_2 / u_0 называется коэффициентом подвижности наносов, находящихся в речном ложе. Можно перейти от средних скоростей к динамическим, используя одну из формул равномерного движения: $u_* = u \sqrt{\lambda / 2}$. В соответствии с вышесказанным в качестве характерного принимается коэффициент гидравлического трения в конце крепления. Величина его определяется критерием Рейнольдса в пределах крепления русла и относительной шероховатостью поверхности бетона. Эти параметры не изменяются в процессе размыва русла, поэтому отношение средних скоростей течения можно заменить отношением соответствующих динамических скоростей: $u_2 / u_0 = u_* / u_{*0}$, где u_{*0} – динамическая скорость потока, соответствующая началу движения частиц несвязного материала [2, 17–19].

Теперь можно записать критериальное уравнение, связывающее относительную глубину воронки местного размыва с определяющими ее параметрами, в таком виде:

$$z_p / h_2 = f(u_* / u_{*0}, Fr_1, n_3, l_k / h_2). \quad (1)$$

Зависимость (1) следует дополнить двумя критериальными уравнениями, описывающими в пределах крепления связь средней скорости с динамической и зависимость коэффициента гидравлического трения от критерия Рейнольдса и относительной шероховатости бетонной поверхности.

В критериальном уравнении (1) число Фруда характеризует уровень турбулентности потока, генерируемой гидравлическим прыжком. В то же время, вместе с коэффициентом затопления это число определяет размеры гидравлического прыжка. Относительная длина крепления также играет двоякую роль: с одной стороны, она характеризует линейный размер крепления, с другой – уровень турбулентности в конце потока.

Если моделирование осуществляется со строгим соблюдением равенства коэффициентов гидравлического трения и чисел Фруда на модели и в натуре («по Фруд»), то подобие потоков в пределах крепления русла будет обеспечено. Заметим, что поток в природных условиях находится в области квадратичного сопротивления, поэтому величина числа Рейнольдса на модели должна быть не меньше значения на нижней границе этой области [1]. Остается обозначить условия, при которых будет обеспечено равенство на модели и в натуре параметра подвижности наносов, который под знаком функции стоит в критериальном уравнении (1) первым. Если такое равенство будет достигнуто, то относительные размеры глубин воронок местного размыва в натуре и на модели будут одинаковыми (воронка размыва на модели будет подобна воронке в натуре).

Для последующих расчетов удобно использовать величину, обратную коэффициенту подвижности. Запишем условие равенства параметра подвижности наносов (в данном случае обратного ему) в условиях природы и модели:

$$(u_{*0}/u_*)_н = (u_{*0}/u_*)_м . \quad (2)$$

Строго говоря, подобного рода утверждение справедливо в случае, когда в критериальное уравнение входят числа подобия. Перейдем к ним, используя результаты исследований, которые содержатся в работах [17–19], а также в обобщающей работе [2]. Опираясь на современные методы физического моделирования гидравлических явлений, автор статьи [2] приводит критериальные уравнения в виде зависимостей от критерия Архимеда числа Рейнольдса, содержащего динамическую скорость потока, при которой частицы зернистого несвязного материала начинают перемещаться. Вид критериальных уравнений зависит от области сопротивления, в конечном итоге – от крупности частиц грунта.

1. В зоне квадратичного сопротивления, которая для кварцевого песка с относительной плотностью $\rho_1/\rho = 2,65$ и при температуре воды, приблизительно равной 20^0C (здесь ρ_1 и ρ – соответственно плотность вещества частиц и жидкости), реализуется при следующих условиях: $Re_* \geq 21$, $Ar \geq 1,62 \cdot 10^4$, $d \geq 0,1$ см, справедлива формула:

$$Re_* = 0,162 Ar^{0,5} . \quad (3)$$

2. В переходной зоне при условиях $0,025 \text{ см} \leq d < 0,1 \text{ см}$; $3,5 \leq Re_* < 21$; $2,53 \cdot 10^2 \leq Ar < 1,62 \cdot 10^4$ получена формула:

$$Re_* = 0,314 Ar^{0,432} . \quad (4)$$

3. В зоне гидравлически гладкого русла, где $0,1 \text{ см} \leq d < 0,025 \text{ см}$; $1,4 \leq Re_* < 3,5$; $16,2 \leq Ar < 253$ имеем:

$$Re_* = 0,502 Ar^{0,35} . \quad (5)$$

Зависимости (3 – 5) можно представить в таком общем виде:

$$Re_* = a Ar^n . \quad (6)$$

Откуда:

$$u_{*0} = a Ar^n v/d . \quad (7)$$

Формулы (3)–(7) содержат критерий Архимеда: $Ar = g d^3 \rho' / \nu^2$, где $\rho' = (\rho_1 - \rho) / \rho$. Зависимости относятся к динамической скорости потока, отвечающей началу трогания частиц наносов. С тем, чтобы в дальнейшем отличить число Рейнольдса $Re_* = u_* d / \nu$, в которое входит динамическая скорость потока u_* , от числа Рейнольдса, содержащего динамическую скорость потока, отвечающую условию начала трогания частиц зернистого несвязного материала, u_{*0} , введем соответствующий символ в это число: $Re_{*0} = u_{*0} d / \nu$. Кроме того, для этого числа подобия будем использовать в дальнейшем его зависимость от критерия Архимеда в общем виде (6). С учетом этих замечаний получим:

$$u_{*0} / u_* = Re_{*0} / Re_* = a Ar^n / Re_* \quad (8)$$

Имея в виду зависимость (8), запишем равенство (2) в таком виде:

$$(a Ar^n / Re_*)_H = (a Ar^n / Re_*)_M \quad (9)$$

Разделив левую часть равенства (9) на правую, получим индикатор подобия

$$\left(a Ar^n / Re_* \right)_H / \left(a Ar^n / Re_* \right)_M = 1 \quad (10)$$

Преобразуем индикатор (10) таким образом, чтобы в него вошли отношения величин в натуре к сходственным величинам на модели. Эти отношения заменим масштабными коэффициентами. После преобразований индикатор подобия (10) станет таким:

$$\left[\frac{a_H}{a_M} (Ar)_M^{n_H - n_M} \frac{k_g k_d^{3n_H - 1} k_\rho^{n_H}}{k_\nu^{2n_H - 1} k_{u_*}} \right] = 1 \quad (11)$$

В нем индексы «н» и «м», как и прежде, относят постоянные и показатели степени соответственно к натуре и модели. Кроме того, в него входят масштабные коэффициенты: динамической скорости потока $k_{u_*} = u_{*H} / u_{*M}$; размеров частиц $k_d = d_H / d_M$; относительной плотности вещества частиц $k_\rho = ((\rho_1 - \rho) / \rho)_H / ((\rho_1 - \rho) / \rho)_M$; ускорения силы тяжести $k_g = g_H / g_M$; кинематической вязкости жидкости $k_\nu = \nu_H / \nu_M$. В таком виде индикатор подобия (11) позволяет установить связь между масштабными коэффициентами, которые в нем содержатся, в частности, между масштабным коэффициентом размеров частиц и линейным масштабным коэффициентом $k_l = l_H / l_M$. В рассматриваемой задаче масштабный коэффициент динамической скорости потока равен масштабному коэффициенту средней скорости потока: $k_{u_*} = k_U$. Моделирование осуществляется «по Фрудру», поэтому имеем: $k_U = k_{u_*} = \sqrt{k_l}$. Далее проанализируем условия, при которых размеры воронки местного размыва, полученные в результате проведенных на модели опытов, можно будет пересчитывать в натурные условия; либо разберем причины, по которым осуществить эту операцию будет невозможно.

1. В условиях модели используются жидкость и частицы грунта тех же размеров и того же минералогического состава, что и в натуре: $k_\nu = k_d = k_\rho = 1$, $a_H = a_M$, $n_H = n_M$.

Моделирование проводят в поле сил земного тяготения: $k_g = 1$. В этих условиях равенство единице индикатора подобия (11) возможно в том случае, если $k_{u_*} = 1$, но тогда $k_U = 1$, $k_l = 1$.

Это означает, что геометрические размеры природы и модели одинаковы, следовательно, моделирование невозможно. Тем не менее, если иного выхода нет, то приближенное моделирование осуществляют в форме, которая получила название «масштабной серии экспериментов». На модели достаточно малых геометрических размеров (с большой величиной линейного масштабного коэффициента k_l) определяют глубину воронки размыва в натурном грунте z_p . Затем делается модель больших геометрических размеров (с меньшим коэффициентом k_l), и опыт повторяют.

Нужно провести подобного рода исследования, по крайней мере, на трех модельных установках, чтобы получить три глубины воронок размыва. Далее в системе координат $(z_p/h_2, k_l)$ наносятся по результатам опытов три точки, которые соединяют кривой (в частном случае – прямой) линией. Кривую экстраполируют до значения $k_l = 1$. Трудности проведения подобного рода исследований очевидны.

2. На модели размеры частиц грунта относятся к той же области сопротивления, что и в натуре; остальные условия проведения опытов сохраняются.

2.1. Размеры частиц грунта относятся к области квадратичного сопротивления: $k_v = k_g = k_p = 1$, $a_n = a_m$, $n_n = n_m = 0,5$. В этом случае индикатор подобия (11) равен единице при условии $\sqrt{k_d}/\sqrt{k_l} = 1$, $k_d = k_l$. Следовательно, масштабный коэффициент размера частиц грунта равен линейному масштабному коэффициенту. Одновременно это означает, что относительные размеры воронки размыва в натуре и на модели в соответствии с критериальным уравнением (1) будут одинаковыми: $(z_p/h_2)_n = (z_p/h_2)_m$. Если, например, выбрать на модели крупность частиц грунта на нижней границе области квадратичного сопротивления ($d_m = 0,1$ см – это крупнозернистый песок), то при величине линейного масштабного коэффициента $k_l = 50$ в натуре ему будет соответствовать крупность частиц $d_n = 5,0$ см, а это галька. Следовательно, область использования такого рода моделирования ограничена предгорными и горными участками рек.

2.2. Грунт представляет собой мелкозернистый песок: $k_v = k_g = k_p = 1$, $a_n = a_m$, $n_n = n_m = 0,35$. В этих условиях равенство единице индикатора подобия (11) станет возможным при условии $k_d^{0,05} = k_l^{0,5}$, $k_d = k_l^{10}$. Даже если величину линейного масштабного коэффициента принять $k_l = 2$ (модель всего в два раза меньше натуре), то на модели размер частиц должен быть приблизительно в тысячу раз меньше размера частиц в натуре, а это связный грунт. Следовательно, моделирование невозможно.

Отсюда естественно желание принять крупность материала на модели и в натуре одинаковым, изменяя в условиях модели либо вязкость жидкости, либо плотность вещества частиц.

3. На модели размеры частиц такие же, как в натуре: $k_d = 1$.

3.1. На модели используем жидкость, обладающую иной вязкостью, чем вода; грунт представлен мелкозернистым кварцевым песком: $k_g = k_p = 1$, $a_n = a_m$, $n_n = n_m = 0,35$. Равенство единице индикатора подобия (11) станет возможным при условии $k_v^{0,3} = k_l^{0,5}$, $k_v = k_l^{10/6}$. Например, если принять $k_l = 25$, то получим: $v_m = v_n/213,7$. Результат не требует комментариев.

3.2. На модели используем воду; плотность вещества частиц на модели, заменяющих мелкозернистый кварцевый песок в натуре, отличается от плотности кварца: $k_g = k_v = 1$, $a_n = a_m$, $n_n = n_m = 0,35$. В этом случае равенство единице индикатора подобия (11) станет возможным при условии $k_p^{0,35} = k_l^{0,5}$, $k_p = k_l^{10/7}$. Если принять, как в предыдущем случае $k_l = 25$, то получим $k_p = 99,3$. Отсюда имеем: $((\rho_1 - \rho)/\rho)_m = ((\rho_1 - \rho)/\rho)_n/99,3$. При условии $\rho_1/\rho = 2,65$ получим $((\rho_1 - \rho)/\rho)_m = 0,027$; $(\rho_1/\rho) = 1,027$. Проводить опыты на модели с заменителем песка, плотность вещества которого практически не отличается от плотности воды, очень трудно (необходимо предварительно замачивать заменитель, наблюдается постоянное всплывание частиц на поверхность воды по причинам, не всегда объяснимым, и т. п.).

4. На модели и в натуре один и тот же песчаный грунт, но размеры частиц грунта относятся к разным областям сопротивления: на модели используется мелкозернистый песок, в то время как в натуре песок относится к области квадратичного сопротивления. Пусть на модели $d_m = 0,01\text{см}$, $n_m = 0,35$, $a_m = 0,502$, $\nu_m = 0,01\text{см}^2/\text{с}$, $(\rho_1/\rho)_m = 2.65$, тогда $Ar_m = 16,2$. В натуре $n_n = 0,5$, $a_n = 0,162$, кроме того, $k_\rho = 1$, $k_\nu = 1$. Из условия равенства единице индикатора подобия (11) имеем:

$$\left[(16,2)^{0,15} 0,162 k_d^{0,5} / 0,502 k_l^{0,5} \right] = 1, \quad k_d = 4,16 k_l.$$
 Если принять, как в п. 2.1, $k_l = 50$, то $k_d = 208$, $d_n = 2,08\text{см}$. В п. 2.1 было принято $d_m = 0,1\text{см}$, в результате расчетов получили $d_n = 5,0\text{см}$. Следовательно, при использовании на модели более мелкого материала крупность частиц в натуре тоже уменьшается. Результат вполне ожидаем, однако при этом не достигается возможность осуществить моделирование местного размыва русла за водосбросами, расположенными на равнинных участках рек. В лучшем случае подобное моделирование путем использования на модели более мелкого песчаного материала, чем в натуре, возможно только на предгорных участках рек.

5. Сформулируем задачу по-иному, а именно: каким должно быть максимальное значение линейного масштабного коэффициента (или минимальный размер модели) при моделировании местного размыва русла, сложенного в натуре среднезернистыми песками, с использованием на модели мелкозернистого материала иной, чем в натуре, плотностью, но такой, которая не создавала бы трудностей при выполнении исследований? Допустим, что в условиях модели принято: $(\rho_1/\rho)_m = 1,1$, тогда $k_\rho = 16,5$, при $d_m = 0,01\text{см}$; $Ar_m = 0,98$; $a_m = 0,502$; $n_m = 0,35$. В натуре $0,025\text{см} \leq d_n \leq 0,1\text{см}$, $a_n = 0,314$, $n_n = 0,432$; $k_g = 1$, $k_\nu = 1$. Имеем:
$$\left[(0,98)^{0,082} 0,314 k_d^{0,296} 16,5^{0,432} / 0,502 k_l^{0,5} \right] = 1; \quad k_l = 4,39 k_d^{0,592}.$$
 Допустим, что $d_n = 0,075\text{см}$, тогда $k_d = 7,5$, $k_l = 14,5$. Следовательно, размеры модели получаются довольно большими.

Выводы

1. Моделирование местного размыва русла за водосбросными плотинами требует глубокого анализа причин, влияющих на образование воронки размыва. К ним относятся: гидравлический прыжок как источник высокой турбулентности потока; слепопрыжковый участок, в пределах которого происходит процесс затухания турбулентности; относительная шероховатость бетонного крепления русла; гранулометрический состав несвязного грунта в русле реки и величина скорости, при которой он приходит в движение.

2. В основу анализа должны быть положены современные методы физического моделирования сложных гидравлических явлений, позволяющие найти связи между коэффициентами подобия параметров, определяющих явление, в том числе связь линейного масштабного коэффициента с масштабным коэффициентом глубины потока.

3. На основании выполненных исследований можно утверждать, что при моделировании местного размыва русла за водосбросами, расположенными на горных и предгорных участках рек, русло которых сложено крупнозернистым несвязным материалом, глубину воронки размыва и крупность отдельностей можно переносить с модели на оригинал как линейные величины.

4. Моделирование местного размыва за водосбросами на равнинных реках, протекающих в речных отложениях, представленных мелко- и среднезернистыми песками, возможно только при использовании на модели заменителя песка с меньшей плотностью вещества, чем плотность кварца. Размеры модели получаются довольно большими (так, в рассмотренном выше примере модель должна быть не более чем в пятнадцать раз меньше натуре).

5. Альтернативой методу моделирования, изложенному в п. 4, может быть масштабная серия экспериментов.

Литература

1. Михалев М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 443 с.
2. Михалев М.А. О моделировании условий начала трогания частиц несвязного зернистого материала // Журнал Университета водных коммуникаций. 2009. №1. С. 43-50.
3. Михалев М.А. Скорость свободного движения плохобтекаемых тел в жидкости // Инженерно-строительный журнал. 2012. №2. С. 56-60.
4. Михалев М.А. Гидравлический расчет напорных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2012. №6. С. 20-28.
5. Михалев М.А. Теория подобия и размерностей: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 68 с.
6. Кумина Т.Д., Михалев М.А. Инженерная гидрология: Учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1989. 84 с.
7. Михалев М.А., Канарский Н.Д. Неразмывающая скорость для несвязных однозернистых грунтов в условиях мостовых опор различных конструкций // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. Саратов: Изд-во СПИ, 1988. С. 40-48.
8. Mikhalev M.A. Modelling of Channel Processes in Lower Pools of Spillway Dams // Proceedings of 10th International Symposium on River Sedimentation. August 1-4. Moscow, Russia. Volume III. Moscow, 2007. Pp. 227-232.
9. Jones J.S., Richardson E.V. A Decade of High Priority Bridge Scour Research in the U.S. // Second International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2), Singapore, 2004. Pier & Abutment Scour. Paper №3. Pp. 1-7. (CD-version).
10. Sharp J. Hydraulic modelling. London: Butterworths, 1981. 280 p.
11. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. С. 1-32.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. С. 421-694.
13. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967. 235 с.
14. Зегжда А.П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. Л.-М.: Госстройиздат, 1938. 162 с.
15. Михалев М.А. Гидравлический расчет потоков с водоворотом. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. 184 с.
16. Хапаева А.К. Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне как пристенная струя // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 1970. Т. 92. С. 234-245.
17. Shields A. Anwendung der Ahnlichkeitmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung // Mitteilungen der Preuß. Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau. 1936. No. 26.
18. Кнороз В.С. Неразмывающая скорость потока и факторы, ее определяющие // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1958. Т. 59. С. 62-81.
19. Кнороз В.С. «Неразмывающие» (предельные) скорости разнотернистых по крупности несвязных материалов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1962. Т. 71. С. 19-38.

**Михаил Андреевич Михалев, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)535-46-10; эл. почта: mikhalev@cef.spbstu.ru*

© Михалев М.А., 2013

doi: 10.5862/MCE.37.10

Modeling of channel erosion downstream spillway dams

M.A. Mikhalev,*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*
+7(812)535-46-10; e-mail: mikhalev@cef.spbstu.ru

Key words

spillway dams; channel erosion; non-cohesive soil; methods of similarity and dimension theory; criteria equation; Froude number; Archimedes number; Reynolds number; depth of the local erosion; model; prototype

Abstract

The channel erosion downstream spillway dams in non-cohesive materials has been analyzed from the viewpoint of methods of similarity and dimension theory.

The obtained criterion equation connects the maximum depth of the local erosion with its determining parameters: length of concrete lining of bed in the down water of the spillway dam; Froude number at the contracted cross section; Archimedes and Reynolds criterions; submergence factor of hydraulic jump.

The problem may be formulated as follows: the geometric size of the structure, kinematics and dynamics of the flows in the model are similar to that in the prototype. Conditions under which the characteristic depth of the local erosion in the model would be recomputed into the prototype, like any geometric size, are being discussed.

References

1. Mikhalev M.A. *Fizicheskoye modelirovaniye gidravlicheskih yavleniy: Ucheb. Posobiye* [Physical modeling of hydraulic phenomenon: tutorial]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGPU, 2008. 443 p. (rus)
2. Mikhalev M.A. *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsiy*. 2009. No.1. Pp. 43–50. (rus)
3. Mikhalev M.A. *Magazine of Civil Engineering*. No.2. 2012. Pp. 56–60. (rus)
4. Mikhalev M.A. *Magazine of Civil Engineering*. No.6. 2012. Pp. 20–28. (rus)
5. Mikhalev M.A. *Teoriya podobiya i razmernostey: Ucheb. Posobiye* [Similarity and dimensional theory: tutorial]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001. 68 p. (rus)
6. Kumina T.D., Mikhalev M.A. *Inzhenernaya gidrologiya: Ucheb. Posobiye* [Engineering hydrology: tutorial]. Leningrad: Izd-vo LPI, 1989. 84 p. (rus)
7. Mikhalev M.A., Kanarskiy N.D. Nerazmyvayushchaya skorost dlya nesvyaznykh odnozernistykh gruntov v usloviyakh mostovykh opor razlichnykh konstruksiy. *Sovershenstvovaniye metodov gidravlicheskih raschetov vodopropusknykh i ochistnykh sooruzheniy*. Saratov: Izd-vo SPI, 1988. Pp. 40–48. (rus)
8. Mikhalev M.A. Modelling of Channel Processes in Lower Pools of Spillway Dams. *Proceedings of 10th International Symposium on River Sedimentation. August 1–4. Moscow, Russia*. Volume III. Moscow, 2007. Pp. 227–232.
9. Sterling J.S., Richardson E.V. A Decade of High Priority Bridge Scour Research in the U.S. *Second International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2), 2004, Singapore*. Pier & Abutment Scour. Paper 3. Pp. 1–7. (CD-version).
10. Sharp J. *Hydraulic modelling*. London.: Butterworths, 1981. 280 p.
11. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similitude and dimensional method in mechanics]. Moscow: Nauka, 1977. Pp. 1–32. (rus)
12. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow: Nauka, 1973. Pp. 421–694. (rus)
13. Levi I.I. *Modelirovaniye gidravlicheskih yavleniy* [Modeling of hydraulic phenomena]. Leningrad: Energiya, 1967. 235 p. (rus)
14. Zegzhda A.P. *Teoriya podobiya i metodika rascheta gidrotekhnicheskikh modeley* [Similarity theory and design procedure of hydrotechnical models]. Leningrad–Moscow: Gosstrooyizdat, 1938. 162 p. (rus)
15. Mikhalev M.A. *Gidravlicheskiy raschet potokov s vodovorotom* [Hydraulic calculation of eddy flows]. Leningrad: Energiya. Leningr. otd-niye, 1971. 184 p.

Mikhalev M.A. Modeling of channel erosion downstream spillway dams

16. Khapayeva A.K. *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneyeva*. 1970. Vol. 92. Pp. 234–245. (rus)
17. Schields A. Anwendung der Ähnlichkeitmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preuß. Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau*. 1936. No.26.
18. Knoroz V.S. *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneyeva*. 1958. Vol. 59. Pp. 62–81. (rus)
19. Knoroz V.S. *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneyeva*. 1962. Vol. 71. Pp. 19–38. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 67–74