например, каменным зубом, ограничивающим распространение воронки размыва под полотнище в сторону верхнего бьефа.

Физическая картина размыва вставки для расчетного случая схожа с полученной ранее для плоской задачи [1, 2]. Причем интенсивный размыв происходит на ширине, примерно равной первоначальной ширине перелива, что следует иметь в виду при расчете размыва по существующим зависимостям [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Богославчик П.М., Филиппович И.В. Динамика размыва плотины из местных материалов при переливе воды. — Изв. вузов СССР. Серия Энергетика, 1982, № 3, с. 88—93. 2. Богославчик П.М., Филиппович И.В. К расчету размыва однородной плотины из песчаных грунтов при переливе воды через гребень. — Там же, 1983, № 2, с. 100—105. 3. Проектирование и строительство больших плотин. Вып. 2. Постоянные и временные водосбросные сооружения/Под ред. А.А.Борового. По материалам IX Международного конгресса по большим плотинам. — М., 1981, с. 123—126. 4. Филиппович И.В., Богославчик П.М. Водосброс по типу размываемой вставки. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство, 1982, вып. 12, с. 96—100. 5. Mupti N.G.K. Breaching sections. — Irrigation and Power, 1978, 35, № 3, 341—363.

УДК 627.11:532.5.0015.7

В.М.ЛАРЬКОВ, канд. техн. наук (БСХА)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫВА РУСЛ ЗА ВОДОСБРОСНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ РАЗМЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОТОКА

Для ответственных и сложных объектов оценку размываемости русла осуществляют с помощью физического моделирования и натурных наблюдений [1—10]. В практике гидротехнических лабораторных исследований известно два основных метода — масштабных серий (экстраполяций) и подобия руслослагающих материалов. Первый, как весьма трудоемкий, в практике лабораторных исследований применяется сравнительно редко.

Метод подобия руслослагающих материалов менее трудоемок и достаточно теоретически обоснован. Однако при его использовании часто возникают технические трудности, связанные с созданием моделей, идентичных натуре, поскольку требуется обеспечить подобие устойчивости как материала русла (местных деформаций), так и потока жидкости.

Для того чтобы обеспечивать подобие потоков жидкости натуры и модели, размываемая гидравлическая модель русла должна удовлетворять ряду условий [1—3], суть которых можно выразить критериальной зависимостью

$$\varphi(\mathrm{Fr};\ \mathrm{Re};\ \mathrm{Ka};\ \mathrm{Sh};\ \mathrm{Eu};\ \lambda\ldots) = \mathrm{idem}. \quad (1)$$

Из зависимости (1) следует, что рассматриваемый динамический процесс определяется несколькими действующими силами различной физической природы. При этом степень значимости конкретной силы в данном процессе, как правило, различна. Если две или более из значимых сил существенны, процесс моделирования значительно усложняется, так как необходимо одновременно обеспечить подобие нескольких частных законов. Особую сложность представляют исследования русловых процессов, касающиеся моделирования мелкозернистых или связных грунтов, поскольку физически трудно выполнить строгое геометрическое подобие при подборе материала модели. Чаще всего при этом используют методику приближенного моделирования, связанную с применением искусственных (негрунтовых) материалов и разномасштабных (геометрически искаженных) моделей [1, 9].

Рассмотрим динамический процесс размыва несвязного материала сопрягающего русла с донным режимом сопряжения. За водосбросными сооружениями этот участок характеризуется мощной турбулентностью потока, вихреобразованием, неравномерностью удельных расходов и эпюр скоростей. Для этих условий критериальное уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\varphi(Fr;\ Ka;\ Re) = idem \qquad (2)$$

или

$$Fr = idem;\ Ka = idem,\ Re = idem. \qquad (3)$$

При этом для автомодельной области, для которой $Re_м \geqslant Re_{пр}$, необязательно моделировать относительную шероховатость русла [2, 597]. Для установившегося процесса отпадает необходимость в критерии Струхаля. Исходя из указанных предпосылок, при моделировании установившихся русловых процессов за водосбросными сооружениями важно учитывать критерии Фруда и Кармана. По первому

$$Fr = V^2/gh \qquad (4)$$

определяют геометрический масштаб модели и кинематические параметры потока. Критерий Кармана

$$Ka = V'/V \qquad (5)$$

характеризует турбулентность в данной точке потока.

В формулах (4) и (5) : V_1 — средняя на вертикали скорость; V — пульсационная составляющая скорости; h — глубина потока; g — ускорение свободного падения.

Для количественной и качественной оценки числа Ka рассмотрим зависимость [7, с. 98 и 8; с. 350–352] :

$$h_р = K_р q / V_{доп}. \qquad (6)$$

Здесь $K_р$ — коэффициент, характеризующий размывающую способность потока; $h_р$ — глубина размыва; q — удельный расчетный расход; $V_{доп}$ — допускаемая неразмывающая скорость. Решая выражение (6) относительно $K_р$, получаем:

$$K_р = h_р V_{доп}/q = h_р V_{доп}/V h_р$$

или

$$K_р = V_{доп}/V. \qquad (7)$$

Переходя к актуальной скорости в некоторой точке потока и учитывая (3), имеем

$$K_p = (V + V')/V = 1 + Ka. \tag{8}$$

Из анализа зависимостей (3), (5) и (8) следует, что

$$K_p = \text{idem}. \tag{9}$$

Установим основные масштабные коэффициенты модели, удовлетворяющие условию (9). Для практических удобств примем

$$V_{доп} = V_{01} h_p^m, \tag{10}$$

где V_{01} — допускаемая скорость на размыв при глубине потока 1 м.

Тогда $h_p = K_p q/V_{01} h_p^m$,

откуда $K_p = h^{1+m}/q/V_{01}$ или $\sqrt[1+m]{K_p} = h_p / \sqrt[1+m]{q/V_{01}}$.

Принимая, согласно (6), значение $m = 0{,}25$, получим зависимость

$$\sqrt[1{,}25]{K_p} = h_p / \sqrt[1{,}25]{q/V_{01}}, \tag{10}$$

которую для условия (9) можно записать в виде

$$h_н / \sqrt[1{,}25]{q_н/V_{01н}} = h_м / \sqrt[1{,}25]{q_м/V_{01м}}. \tag{11}$$

Выполним некоторые преобразования условия (11):

$$h_н / h_м = \sqrt[1{,}25]{q_н/q_м V_{01м}/V_{01н}} \tag{12}$$

или $h_н/h_м = \sqrt[1{,}25]{V_н h_н / V_м h_м V_{01м}/V_{01н}}$.

Введя масштабные коэффициенты

$$h_н/h_м = \lambda h;\ V_н/V_м = \lambda v;\ V_{01н}/V_{01м} = \lambda_{v01},$$

получаем:

$$\lambda h = (\lambda_v / \lambda_{v01})^4;\ \lambda_v = \lambda^{0{,}25} h \lambda_{v01}. \tag{13}$$

Данный масштабный комплекс удовлетворяет лишь критерию K_p. С целью соблюдения и учета условия (2) для автомодельной области примем, согласно критерию Фруда,

$$\lambda_q = \lambda_L^{1{,}5}. \tag{14}$$

Решая совместно выражения (12), (13) и (14), получаем

$$\lambda_h = \sqrt[1{,}25]{\lambda_L^{1{,}5}/\lambda_{v01}};$$

$$\lambda_v = \sqrt[1{,}25]{\lambda_L^{0{,}375}\,\lambda_{v01}} \tag{15}$$

или

$$\lambda_v = \sqrt[1{,}25]{\lambda_L^{0{,}875}\,\lambda_h^{0{,}25}}\,; \quad \lambda_{v01} = \lambda_L^{0{,}7}/\lambda_h^{0{,}45}\,.$$

Для частного случая, когда

$$\lambda_h = \lambda_L,\ \lambda_{v01} = \lambda_L^{0{,}25}. \qquad (16)$$

Оценку данной методики и ее масштабных коэффициентов можно произвести на основании анализа результатов аналитических и экспериментальных данных, полученных для условий геометрического и кинематического подобия. При строгом геометрическом подобии крупность частиц материала модели, по плотности равной плотности материала натуры, должна удовлетворять [1, 5]:

$$d_н/d_м = \lambda d = \lambda_L\,. \qquad (17)$$

Проанализируем, как обеспечивается условие (17) для натурных данных при моделировании размываемого русла по предлагаемому комплексному критерию φ (Fr; K_p). Для этого воспользуемся значениями допускаемых на размыв скоростей и соответствующих им диаметров частиц несвязных грунтов, приведенных в ТУ и Н (Ст-24-2396) [1, 199], а также данными Б.И. Студеничникова [6, 8; 74].

Примем произвольно λ_L = 20 и, задавшись рядом значений $V_{01н}$, определим $V_{01м}$ по (16). Используя ТУ и Н, а также данные [6], установим соответствующие им значения диаметров частиц неразмываемого грунта (табл. 1).

Из таблицы видно, что при моделировании песчано-гравелистых грунтов по комплексному критерию подобия φ(Fr; K_p) = idem с использованием данных ТУ и Н (Ст-24-2996) масштабный коэффициент λd отличается от линейного масштаба модели λ_L в 1,5–2 раза, а при моделировании только по Фруду — в 5–6 раз. Достаточно приемлемые результаты получаются при подборе материала по допускаемой неразмывающей скорости, взятой по Б.И.Студеничникову. В этом случае при использовании комплексного критерия масштабное искажение размываемого материала модели практически отсутствует, а при

Таблица 1. **Результаты подбора материала модели по разным методам**

λ_L	Для натуры		Для модели по K_p и Fr			Для модели по Fr		
	$V_{0,1}$, м/с	d, мм	V_{01}, м/с	d, мм	λ_d	V_{01}, м/с	d. мм	λ_d
20	0,65	2,5	0,31	0,22	11,4	0,14	0,020	125
	0,80	5,0	0,38	0,32	15,6	0,18	0,040	100
	1,00	10,0	0,47	0,63	15,9	0,22	0,075	133
	1,20	15,0	0,57	1,42	10,6	0,27	0,150	100
	2,00	51,0	0,95	8,00	5,1	0,45	0,640	70
	3,40	150,0	1,61	35,00	4,3	0,76	4,300	35
	4,00	200,0	1,89	48,00	4,2	0,90	7,300	21

моделировании по Фруду в рассмотренном случае значение λ_d оказалось в 20 раз больше λ_L. Следовательно, иногда моделирование размыва русл только по Фруду, т.е. без учета критерия K_p, будет давать заведомо неправильные результаты.

Поскольку при моделировании размываемого русла не всегда возможно выполнить условие

$$\lambda_{v01} = \lambda_L^{0,25} \tag{18}$$

и обеспечить $\lambda_d = \lambda_L$, материал модели подберем из условия (15), задавшись отношением $\lambda_h / \lambda_L = n$.

При этом необходимо обеспечить граничные условия автомодельности процесса и учесть (или исключить) влияние сил сцепления. Согласно последним исследованиям, этим влиянием можно пренебречь при $d \geqslant 0,8$ мм.

Установим граничные значения масштабных коэффициентов.

Для автомодельной области

$$Re_м = V_м h_м / \nu \geqslant Re_{пр} \text{ или } V_м h_м > Re_{пр} \nu.$$

Заменив $V_м$ значением (10), получим

$$V_{01м} h_м^{1,25} \geqslant Re_{пр} \nu.$$

С учетом (10) $K_p q_м > Re_{пр} \nu$

или

$$q_м > \frac{Re_{пр}}{K_p} \nu. \tag{19}$$

Значение K_p примем предварительно равным 1,05–1,1. Решая совместно уравнения (18) и (19), получим:

$$\lambda_{L\,пр} < \sqrt[1,5]{K_p q_н / Re_{пр} \nu};$$

$$\lambda'_{v01} < \lambda_{L\,пр}^{0,25} / n^{0,45}, \tag{20}$$

Для натуры [6]		Для модели по Fr и K_p			Для модели по Fr		
V_{01}, м/с	d, мм	V_{01}, м/с	d, мм	λ_d	V_{01}, м/с	d, мм	λ_d
0,65	1,06	0,31	0,055	19,3	0,145	0,003	353
0,80	2,40	0,38	0,122	19,6	0,180	0,006	400
1,00	5,95	0,47	0,291	20,4	0,224	0,015	397
1,20	12,35	0,57	0,628	19,7	0,270	0,032	386
2,00	95,30	0,95	4,850	19,7	0,450	0,244	390
3,40	795,00	1,61	40,000	19,9	0,760	2,000	391
4,00	1524,00	1,89	75,900	20,1	0,902	3,900	390

При искажении геометрического масштаба подбор материала модели может быть выполнен по-разному. Например, подбирают масштаб $\lambda_L < \lambda_{L\,гр}$; задаются значением $\lambda_h = n\lambda_L$ (согласно [1; 2], принимают n = 2—6) ;по формуле (18) определяют значение λ_{v01}, которое, согласно выражению (20), должно быть меньше λ'_{v01}. По λ_{v01} и натурным данным находят допускаемую скорость V_{01} и соответствующий ей вид (размер частиц) грунта. По второму варианту можно, задавшись значением $d_м$, определить λ_{v01}, λ_L, λ_h и т.д.

Полученные на модели данные пересчитывают для натурных измерений с помощью масштабных коэффициентов (16) или (18).

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по гидравлическим расчетам/Под ред. П.Г.Киселева. — М., 1975. — 313 с. 2. Гидротехнические сооружения/ Под. ред. Н.П.Розанова. — М., 1978. — 648 с. 3. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русл и методика оценки их устойчивости. — М., 1970. — 179 с. 4. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. — Л., 1962. — 374 с. 5. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. — М., 1967. — 235 с. 6. Студеничников Б.И. Защита от размыва русл и нижних бьефов водосбросов: Рекомендации по проектированию. — М., 1974. — 45 с. 7. Российский К.И. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений. — Тр. АН СССР, 1956. Сб. № 6. Проблемы регулирования речного стока. — 46—50 с. 8; Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика. — М., 1983. — 544 с. 9. Васильченко Г.В., Лукошко Р.Ф. Исследование уровенного режима половодий на физической модели участка р. Припяти при обваловании реки дамбами. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1980, вып. 10, с. 103—109. 10. Ляхтер В.М., Прудовский А.Гидравлическое моделирование. — М., 1984. — 392 с.

УДК 532.517.4:51

Ю.М.КОРЧОХА, канд. техн. наук,
В.П.ШЕЙНОВ, канд. физ.-мат. наук
(БелНИИМиВХ)

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ РЕЧНОГО ПОТОКА ПРИ ГРЯДОВОМ РЕЛЬЕФЕ ДНА

Кинематическая структура естественного руслового потока при наличии на дне его песчаных гряд представляет наименее изученный и вместе с тем наиболее сложный случай скоростного поля потока.

Имеющиеся сведения о кинематической структуре естественного потока с грядовым дном либо ограничены данными об осредненных скоростях, либо, если это даже турбулентные характеристики, не увязаны с конкретными русловыми формами.

В предлагаемой работе предпринята попытка представить скоростное поле потока, обтекающего вполне конкретные русловые формы (песчаные гряды). Поток характеризуется числом $Re = 7 \cdot 10^5 - 9{,}4 \cdot 10^5$, а его дно — относительной зернистой шероховатостью $d_{50}/H = 7{,}27 \cdot 10^{-5}$. Ширина потока 30 м. Характер наносов, слагающих песчаные гряды, представлен в табл. 1.