

кинемагической модели процесса формирования берегов существующих водохранилищ. — Там же, с. 130-132. 6. Левкевич В.Е. Об основных берегообразующих факторах малых равнинных водохранилищ. — Достижения молодых ученых в области геологии, геофизики, географии: Тез. докл. науч.-техн.конф. Пермь, 1980, с. 3-4.

УДК 532.5.071.4

Г.В.ВАСИЛЬЧЕНКО, канд.техн.наук (ЦНИИКИВР)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫВОВ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИХ ЗАМЕНИТЕЛЕЙ

Общепризнанным является то, что при использовании размываемых моделей необходимо учитывать совместно критерии динамического подобия водного потока и подобия деформации его основания. Для этого требуется знание критериев размываемости грунта. Автором исследовалась связь между характеристиками течения жидкости в придонной области потока и перемещения частиц несвязного грунта (песок, полимерные материалы) с помощью одновременной видеозаписи сигналов от датчиков скорости (электродов, вводимых в придонный слой) [1, 2] и перемещений частиц грунта.

Исследования показали, что вынос частиц в поток происходит в том случае, когда средняя по высоте верхнего ряда частиц грунта продольная актуальная скорость

$$u_{ca} = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} (\bar{u}_1 + u'_1) dy \quad (1)$$

превысит допустимую  $u_{сад}$ , соответствующую началу перемещения частицы, а длительность ее действия  $t_a$  превысит время выхода частицы в поток  $t_{ад}$ . В выражении (1)  $\bar{u}_1$  — осредненная во времени придонная скорость;  $u'_1$  — пульсация продольной скорости в течение  $t_a$ ;  $\Delta = d_{CB}/2$  — абсолютная высота выступов шероховатости;  $d_{CB}$  — средневзвешенный диаметр частиц грунта. Поэтому разрушение поверхности грунта потоком происходит при совпадении условий

$$u_{сад} \leq u_{ca} \quad (2)$$

и

$$t_{ад} \leq t_a \quad (3)$$

В соответствии с этим интенсивность отрыва частиц грунта от дна характеризуется совместной вероятностью  $P_a$  наступления условий (2) и (3) и размером вихрей  $L_a$  у дна. Кроме того, она может характеризоваться количеством частиц  $N_a$ , выносимых в поток с единицы площади дна в единицу времени. Следует заметить, что размыв дна складывается из выноса одних и возврата других частиц грунта на рассматриваемую площадку, но при определении  $N_a$  учитываются лишь выносимые частицы.

В общем случае рассмотренные выше величины  $u_{ca}$ ,  $t_a$ ,  $P_a$ ,  $L_a$  и  $N_a$  зависят от динамической скорости  $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$  ( $\tau_0$  — касательное напряжение на дне

потока), глубины потока  $H$ , размеров частиц грунта  $d_{св}$ , их веса  $G$  и формы. На этой основе оценку устойчивости грунта размыву (2) и (3) можно заменить менее надежным, но более простым критерием через допустимую на размыв динамическую скорость  $u_{*д} = f(d_{св}, H, G)$ . При таком подходе имеем

$$u_* < u_{*д} \quad \text{— грунт не размывается;} \quad (4)$$

$$u_{*д} = u_* \quad \text{— предельное состояние;} \quad (5)$$

$$u_{*д} < u_* \quad \text{— грунт размывается.} \quad (6)$$

Условия (4)–(6) принимаются при допущении, что в придонном слое потока распределение вероятности пульсаций продольной скорости близко к нормальному. Предельное сопротивление грунта размыву (5) принимается при вероятности появления  $u_{сад}$ , равной 0,3 % (наибольшая по амплитуде мгновенная скорость). С учетом этого для песков различной неоднородности  $d_{95}/d_5$  в лабораторных условиях при постоянной глубине потока  $H = 0,4$  м (рабочая глубина на установке со специальным оборудованием) определены допускаемые на размыв динамические скорости  $u_{*д0,4}$  (рис. 1). Влияние глубины потока и размеров частиц песка на турбулентность в его придонной области, а следовательно, на изменение  $u_{*д}$  учитывается введением поправочного коэффициента  $K_*$ :  $u_{*дH} = K_* u_{*д0,4}$ , который вычисляется с использованием эмпирической зависимости

$$\lg K_* = \frac{0,0384}{d_{св}^{0,378}} (\lg H - 1,6) * \quad (7)$$

Подбор заменителя песка для размываемой модели осуществляется следующим образом. С учетом геометрических масштабов модели, критериев Фруда, Кармана и трения подбирается диаметр частиц заменителя (для получения нужной шероховатости на модели), при котором обеспечивается подобие осредненного и пульсационного течения жидкости в придонной области моделируемого потока, а при отсутствии искажения геометрических масштабов модели — и подобие динамической скорости. Затем на модели (с учетом указанных критериев и масштабных соотношений) устанавливается течение, соответствующее в натуре случаю предельной динамической скорости  $u_{*д}$ , и исследуется вероятность перемещения частиц заменителя грунта, имеющих различный вес, но с выбранным ранее размером частиц  $d_{св}$ . Искомым является заменитель грунта, у которого частицы начинают перемещаться (перекатываться) при появлении актуальной придонной скорости  $u_a = \bar{u}_1 + 3\sqrt{\bar{u}_1^2}$  с вероятностью  $P_a = 0,3$  %. Далее производится дополнительная проверка подобия течений на модели в требуемом диапазоне изменений глубин и уклонов либо глубин и динамических скоростей.

Если натурные данные о распределении осредненных скоростей  $u = f(y)$  в отдельных створах потока при различных значениях глубин и уклонов извест-

\* В зависимости (7) средневзвешенный диаметр частиц песка и глубина потока подставляются в сантиметрах.

ны, то проверка подобия кинематики течений осуществляется заданием аналогичных условий на модели и сравнением распределения скоростей через соответствующие масштабы. Затем определяется величина предельной динамической скорости для грунта натуры (см. рис. 1) и производится подбор заменителя по описанной выше методике.

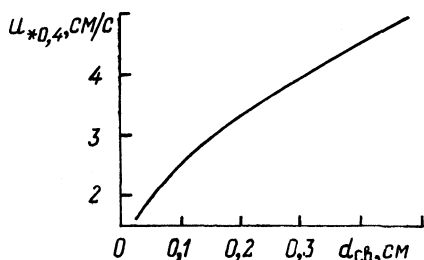


Рис. 1. Зависимость от средневзвешенного диаметра частиц песков ( $\gamma = 2,65 \text{ т/м}^3$ ) допустимой на размыв динамической скорости при глубине потока 0,4 м.

Если натурные данные о распределении скоростей по глубине потока отсутствуют, можно прибегнуть к их расчету в отдельных створах моделируемого участка, где течение близко к плоскому и равномерному (разумеется, если есть такие створы). Для рассматриваемых створов распределение осредненных скоростей определяется путем расчета, например с использованием зависимости [3]:

$$\bar{u} = 2,6u_* [4 + \ln(\frac{y}{\delta} - 0,655)],$$

где  $u_* = \sqrt{gHi}$ ;  $i$  — уклон поверхности потока;  $\delta$  — толщина придонного слоя над шероховатым дном (песок, гравий);  $\delta_{ш} = 5,09 \nu / u_{*Г} (\bar{u}_{*Г} / \nu)^{0,798}$ , над гидравлически гладким  $\delta_{Г} = 7,633 \nu / u_{*Г}$ .

Здесь  $u_{*Г} = 0,417 u_B / \ln(\frac{Nu_B}{\nu}) - 1,47$ ;  $u_B$  — средняя на вертикали скорость.

Приближенное значение  $u_B$  можно вычислить по зависимости

$$u_B = 2,25u_* [3 + 0,2 \ln \frac{u_* \Delta}{\nu} + \ln \frac{H}{\Delta}].$$

Рекомендации по расчету распределения скоростей в придонном слое потока имеются в работе [3].

Возвращаясь к изложенной выше методике подбора заменителя песка для модели, следует отметить, что ее реализация возможна при наличии большого ассортимента заменителей с частицами различных диаметров и веса. Такая возможность существует редко. Поэтому более доступным, хотя менее желательным, является применение того заменителя песка, которым располагает исследователь. Использование случайного заменителя не всегда позволяет обеспечить подобие размывов на модели. Однако иногда удается получить приемлемые результаты. При моделировании во многих случаях искажаются геометрические масштабы моделей, вследствие чего масштаб динамической скорости становится равным

$$M_* = \frac{u_*}{u_{*0}} = \frac{M_H}{\sqrt{M_L}} \quad (8)$$

В свою очередь масштаб глубин  $M_H$  можно найти через масштаб скоростей. Например, при моделировании по критерию Фруда необходимо принять

$$M_H = M_u^2 = \left( \frac{u_B}{u_{B0}} \right)^2 \quad (9)$$

В последних зависимостях все обозначения с индексом 0 относятся к модели. Зная геометрические масштабы модели (8, 9) и параметры потока природы, можно установить все другие масштабные соотношения по общепринятым методикам моделирования. Для использования зависимости (8) масштаб  $M_*$  вычисляется как отношение допустимых на размыв динамических скоростей песка и его заменителя.

В качестве заменителей песков для моделирования размывов можно рекомендовать полимерные сыпучие материалы, например иониты, которые состоят из частиц различных диаметров (от 0,1 до 2 мм) весом в 1,05–1,2 раза тяжелее воды. Такой материал уже несколько лет применяется в ЦНИИ комплексного использования водных ресурсов Минводхоза СССР. Для исследования придонных течений и перемещений частиц песка при подборе его заменителя в лабораторных условиях автором применялись электрохимический способ измерения скоростей [1, 2] и видеозапись.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В а с и л ь ч е н к о Г.В. Исследование крупномасштабной турбулентности электрохимическим способом. — В кн.: Гидравлика и гидротехника. Киев, 1970, вып. 10.
2. А.с. № 800886 (СССР). Устройство для измерения величины и направления скорости течения жидкости/ В а с и л ь ч е н к о Г.В., Н е л и п о в и ч Н.Б. — Оpubл. в Б.И., 1981, № 4.
3. В а с и л ь ч е н к о Г.В. Расчет установившегося течения жидкости над шероховатостью. — В сб.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1981, вып. 11.

УДК 627.533.2

В.К.КУРСАКОВ (ЦНИИКИВР)

### ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОТОКОМ ДАМБ ЗАТАПЛИВАЕМЫХ ПОЛЬДЕРОВ

В последние годы при освоении пойменных земель все большее распространение получают затопливаемые и незатопливаемые польдерные системы [1–3].

Для изучения распределения скоростей течения воды при обтекании потоком затопливаемой дамбы, оценки устойчивости ее размыву проведены экспериментальные исследования на гидравлических моделях.

Согласно [1] и [2], для модели принят один из наиболее распространенных типов дамб со следующими параметрами: высота  $P = 1,5$  м, ширина по