

В. Г. САНОЯН

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЗАИЛЕНИЯ РУСЛОВЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Сооружение гидроузлов на реках коренным образом меняет бытовой режим последних; при этом река уже не может транспортировать извешенные и допные наносы. и в пределах подпертых участков начинается процесс осаждения наносов. Заиление вызывает подъем дна реки, что приводит к повышению уровня воды в верхнем бьефе и в свою очередь перемещается место пыклинивания подпора и увеличиваются площади затопления. Процесс и характер заиления водохранилищ до сих пор мало изучены; это объясняется исключительной сложностью вопроса, т. к. задача об осаждении и размыве в бьефах гидроузлов является существенно нестационарной.

Для вывода уравнений, описывающих процесс заиления и размыва русла сначала устанавливается выражение конвективного изменения интеграла от некоторой величины Φ , взятого по движущемуся объему. Так как в данном случае дно русла является поверхностью разрыва, то его мы выделяем дополнительными контрольными поверхностями, которые включаем в общую совокупность поверхностей ограничивающих указанный объем. Тогда, подставляя в выражение конвективного изменения интеграла от Φ последовательно

$$\Phi = \rho(1 - s^*), \quad \Phi = \rho_s s^*, \quad \Phi = \rho(1 - s^*) V, \quad \Phi = \rho_s s^* V,$$

(где ρ и ρ_s — соответственно плотности жидкости и твердых частиц; s^* — мутность в данной точке; V и V_s — соответственно векторы скоростей жидкости и твердых частиц) и используя законы сохранения масс и количества движения, получаем уравнения, описывающие процесс заиления и размыва в общем виде. Путем приведения этих уравнений к безразмерному виду удастся оценить значения отдельных членов. Для больших чисел Струхала* $Sl = VT/X$ (где V , T и X — соответственно характерная скорость, время и длина) указанные уравнения можно значительно упростить и представить в виде:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

* Это характерно для процесса заиления.

$$\frac{\partial P}{\partial x} + s_0 b \frac{\partial z}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V^2}{C^2 R}; \quad (3)$$

$$s = 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\gamma}{\omega g R} \cdot \frac{V^3}{R}; \quad (4)$$

Здесь Q и P — соответственно жидкий и твердый расходы; s — средняя по сечению мутность; s_0 — содержание наносов в единице объема отложений; b — ширина русла; V — скорость потока; z — отметка дна сечения; h — глубина потока; R — гидравлический радиус; ω — средняя гидравлическая крупность наносов.

Из (1) — (4) легко получаются два уравнения с двумя неизвестными (z и h):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1,35 \cdot 10^{-5} \cdot Q^3}{s_0 g \omega b} \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma}{\omega^3} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q^2}{C^2 \omega^2 R} - \frac{Q^2}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\omega^2} \right). \quad (6)$$

В (5) и (6) ω и γ — соответственно живое сечение и смоченный периметр, которые для заданного поперечного сечения зависят от h и b .

Решение системы (5) — (6) осуществляется двумя способами.

Путем последовательного использования уравнений (5) и (6). При заданном начальном условии $t = 0 \quad z = z_0(x)$, граничном условии $x = 0 \quad h = h_1$ и известном $b = b(x)$, совершенно аналогичным образом, как это делается при построении кривых свободных поверхностей естественных русел, из (6) находим значения $h = h_0(x)$, $\omega = \omega_0(x)$ и $\gamma = \gamma_0(x)$, а следовательно, и $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\gamma}{\omega^3} \right)$. Принимая, что за элементарный промежуток времени Δt эти величины меняются незначительно по сравнению с их первоначальными значениями, из (5) определяем

$$\Delta z_1 = \frac{1,35 \cdot 10^{-5} \cdot Q^3}{s_0 g \omega b} \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \frac{\Delta}{\Delta x} \left(\frac{\gamma_0}{\omega_0^3} \right) \Delta t.$$

Имея Δz_1 , определяем новую отметку дна $z_1 = z_0 + \Delta z_1$. Для этого нового дна из (6) определяем новые глубины, согласно которым по (5) определяем Δz_2 и т. д. Вычисления продолжаем до того момента, пока водохранилище не будет полностью заилено.

Путем одновременного решения уравнений (5) и (6). Система (5) — (6) преобразуется к конечно-разностному виду. Для решения используется неявная схема расчета, позволяющая оперировать большими значениями шага времени Δt при малых значениях Δx , что характерно для процессов заиления или размыва. Нами доказана устойчивость

* Величины b , ω , γ , h и R зависят от координаты x и времени t .

выбранной конечно-разностной схемы с учетом граничных условий и найдено соотношение между безразмерными шагами времени и расстояния.

По выбранной схеме произведены расчеты на ЭВМ. Результаты этих расчетов близки к результатам, полученным по предыдущему способу. Расчеты произведены для призматического русла при следующих данных: $Q = 30 \text{ м}^3/\text{сек}$; $b = 30 \text{ м}$; $h_0 = 3 \text{ м}$; $l_0 = 0.001$; $n = 0.025$; $\omega = 0.001 \text{ м/сек}$; $s_{01} = 0.6$.

На рис. 1 представлены результаты расчета процесса заилиenia. Из графика видно, что отложение наносов начинается в месте выкли-

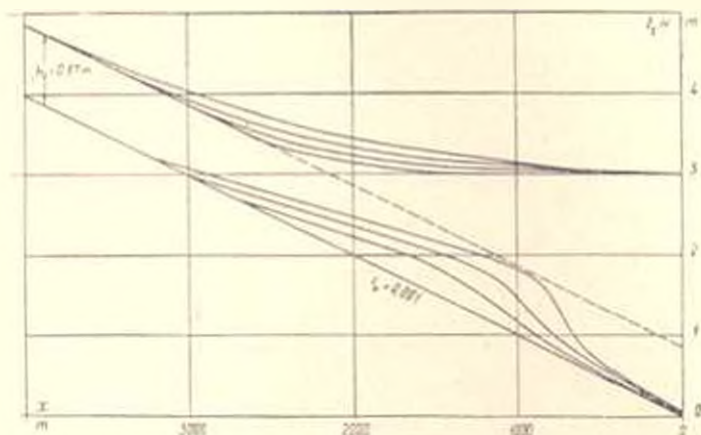


Рис. 1. Вид свободной поверхности и очертания дна в различные моменты времени.

нивании подпора с образованием вала. В следующий промежуток времени этот вал продвигается по направлению к плотине, но одновременно происходит заилиenie на участке реки выше точки выклинивания подпора. Постепенно фронт вала становится все более и более крутым (это напоминает явление образования ударной волны в газовой динамике), а хвост вала движется в противоположном направлении, т. е. вверх по течению. Если снизить горизонт воды у плотины, то начнется обратный процесс: сначала размывается ближайший к плотине участок отложений и этот процесс распространяется вверх от плотины и постепенно фронт вала становится все более и более пологим.

1. Упрощенный способ расчета процесса накопления наносов в створе плотины. Известно, что второй член правой части уравнения (6), выражающий изменение живой силы, в случае подпора мал по сравнению с другими членами и может быть отброшен. Тогда уравнение (6) примет вид:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q^2}{C^2 \omega^2 R} \quad (7)$$

где H — отметка урoня свободной поверхности.

Как показали результаты многочисленных проверок, уравнение кривой свободной поверхности в случае кривой подпора типа a_1 хорошо аппроксимируется следующим уравнением:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{i_0}{2} + \frac{i_0}{2} \operatorname{th} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{i_0}{i_1} - 1 \right) \left(\frac{i_0(1-A)}{H_1 - h_0} x - 1 \right)^m \right]. \quad (8)$$

где

$$A = \frac{1}{m} \frac{i}{i_0 - i_1} \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{i_0}{i_1} - 1 \right)} + \frac{2}{\ln^2 \left(\frac{i_0}{i_1} - 1 \right)} + \frac{2}{\ln^3 \left(\frac{i_0}{i_1} - 1 \right)} \right].$$

Здесь i_0 — уклон реки; i_1 — уклон свободной поверхности в створе плотины ($x=0$); h_0 — нормальная глубина; H_1 — отметка свободной поверхности в створе плотины; m — параметр (натурное число), который определяется из условия совпадения в одной точке действительной кривой подпора с кривой, определяемой по уравнению (8) (при $t=0$).

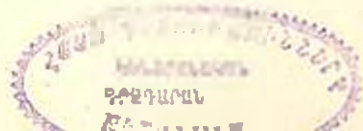
Теперь будем считать, что i_1 зависит от времени. Для простоты рассмотрим случай, когда русло реки параболическое или прямоугольное. Тогда из (7) и (8), выражая h через $\frac{\partial H}{\partial x}$, определяем $\frac{\partial h}{\partial x}$

и $\frac{\partial h}{\partial t}$ и подставляем в уравнение (5), написанное для $x=0$. Полагая, что в створе плотины уровень воды в процессе затопления практически не меняется (это не ограничивает задачу, т. к. закон изменения уровня воды у плотины можно задавать любым; при этом полученное ниже дифференциальное уравнение оказывается с неразделяющимися переменными), после подстановки найденных значений $h_1 \frac{\partial h}{\partial x}$ и $\frac{\partial h}{\partial t}$ в (5) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{di_1}{i_1^3 \left(1 - \frac{i_1}{i_0} \right) (1 + A) \ln \left(\frac{i_0}{i_1} - 1 \right)} = \\ & = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{i_0}{H_1 - h_0} \frac{b}{\omega g} \frac{C}{b_1^2 x} Q^{2,3} dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение этого уравнения легко получится путем приближенного интегрирования. Имея $i_1(t)$, легко определить $h_1(t)$ и $z_1(t)$, т. е. изменения во времени глубины и отметки верха отложений в створе плотины.

На рис. 2, а и б представлены результаты расчета при вышеуказанных численных значениях параметров. Из графиков видно, что уклон свободной поверхности и отметки для водохранилища сначала меняются незначительно, а затем скачком. Последнее означает, что плз подошел к плотине.



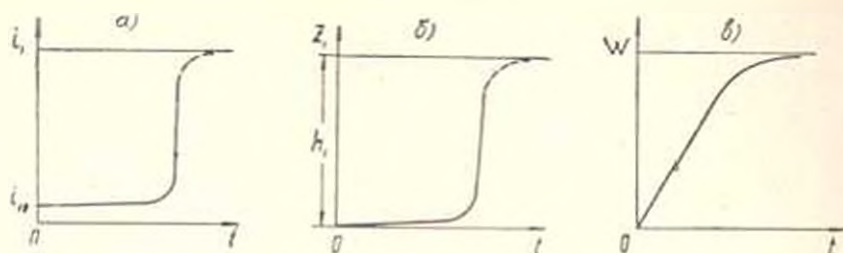


Рис. 2. а—Зависимость уклона свободной поверхности от времени в створе плотины; б—Зависимость отметки дна от времени в створе плотины; в—Зависимость объема наносов от времени.

Когда уклоном свободной поверхности у плотины можно пренебречь по сравнению с уклоном дна, уравнение (9) упрощается и решение получается в следующем виде:

$$t = \frac{\gamma \cdot g \cdot w \cdot s_0 (I_1 - h_0)}{1,87 C^{1/3} E_1^2} \left(\frac{b_1}{Q} \right)^{2/3} \left[E_1 \left(\frac{5}{3} \ln \frac{i_1}{i_0} \right) - E_1 \left(\frac{5}{3} \ln \frac{i_0}{i_1} \right) \right], \quad (10)$$

где i_0 — значение i_1 при $t = 0$; E_1 — интегральная показательная функция. Скачкообразность зависимости $i_1(t)$ следует также из характера функции E_1 (рис. 2, а).

2. **Определение быстроты заиления в различных стадиях.** За время dt в водохранилище осаждается объем наносов

$$dw = Q(s_0 - s_1)dt, \quad (11)$$

где индексами 0 и 1 обозначены величины, относящиеся соответственно к подходу в водохранилище и к створу плотины. Отсюда согласно (4)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{w \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{\gamma} \left(\frac{1}{w_0^2 R_0} - \frac{1}{w_1^2 R_1} \right). \quad (12)$$

В частности, для прямоугольного сечения будем иметь:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{w \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{\gamma} \frac{1}{b_1 \cdot h_1} \left[1 - \left(\frac{b_0}{b_1} \right)^2 \left(\frac{i_1}{i_0} \right)^{4/3} \right]. \quad (13)$$

Мы видели, что $i_1(t)$ с течением времени сначала меняется очень незначительно, а начиная с некоторого момента эта функция начинает быстро увеличиваться. Это означает, что производная $\frac{dw}{dt}$ в начальный момент времени почти постоянна, а после определенного промежутка времени она быстро стремится к нулю, т. е. зависимость $w(t)$ изображается кривой, представленной на рис. 2, в, что согласуется с данными натурных наблюдений [1, 2].

3. **Учет неоднородности распределения наносов по крупности.** При рассмотрении процесса осаждения нужно знать зависимость максимального диаметра w_m от расстояния и от гидравлических элементов

потока. Вопрос установления этой зависимости нами решен применительно к расчету отстойников [2]. Эксперименты, проведенные в Институте водных проблем и гидротехники подтвердили предположение М. А. Великанова [3] о том, что поперечные составляющие лувсационных скоростей для обеих фаз двухкомпонентного потока подчиняются закону нормального распределения. Учитывая это, для вышеуказанной зависимости нами получено следующее выражение:

$$w_m = \frac{1}{2.73} \frac{h(l-x)}{\int_0^l \frac{dx}{u(x)}} \quad (14)$$

где λ для данной обеспеченности p определяется из выражения

$$p = \frac{1}{2} (1 - \operatorname{erf} \lambda).$$

По формуле (14) можно определять распределение наносов по крупности в любом створе водохранилища.

Таким образом, на основании приведенных зависимостей и уравнений определяются: очертание дна водохранилища, вид свободной поверхности воды, а также распределение частиц по крупности в любом створе и в любой момент времени. Полученные уравнения можно применить также для расчета промывки наносов. В этом случае уровень воды принимается переменным, изменяющимся заданным образом.

АрмНИИВПнГ

Поступило 1.11.1971.

Վ. Գ. ՍԱՆՏՅԱՆ

ՀԱՅԿԱՅԻՆ ԶՐԱՄԲԱՐՆԵՐԻ ՏՂԱՄԱԿԱՎՈՐԱՆ ԳՐԱՆՈՒՐ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հողփածում տրվում է ջրամբարներում տղմակալման պրոցեսի հաշվարկման մեթոդ, որը հիմնված է այդ երևույթը նկարագրող հավասարումների լուծման վրա: Հավասարումների լուծման համար առաջարկվում է բևալին եղանակներ: Արդյունքում հնարավոր է դառնում որոշել ջրամբարի հատակի և նրա սղատ մակերևույթի տեսքը ինչպես նաև ջրաբերականների բաշխումը ըստ երկարության՝ ժամանակի տարրեր մոմենտներում: Հողփածի վերջում տրվում է մի մասավոր եղանակ, որով հնարավոր է ստանալ տղմակալման պատճառով ջրամբարի հատակի նիշի բարձրացման որինհաշվարկյունը պատվարին մասիկ համալծրում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Шамов Г. И.* Речные наносы. Гидрометеониздат, Л., 1959.
2. *Саноян В. Г.* Гидравлический расчет отстойных сооружений. Тезисы докладов на Всесоюзной Межазовской конференции „Движение наносов и гидравлический транспорт“, М., 1968.
3. *Великинов М. А.* Динамика русловых потоков. Госэнергоиздат, 1955.