

ГИДРАВЛИКА

В. Г. САЮЖИ

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ СЕЛЕВОГО ПОТОКА  
 В НЕПРИЗМАТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ С ПЕРЕМЕННЫМ  
 УКЛОНОМ ДНА

Известно—какой огромный вред наносят народному хозяйству селевые явления. Для его предотвращения в селеопасных логах осуществляются селепропускные и др. сооружения. Однако, как показывают наблюдения за существующими селепропускными каналами, они, как правило, за один, два наводка заносятся наносами и выходят из строя. Это объясняется тем, что указанные сооружения строятся в селеопасных логах, имеющих в верховьях большой уклон, а вниз по течению уклон постепенно уменьшается. Как следствие—на верхних участках поток может переносить больше наносов, чем в нижних, поэтому если на таких логах строить селепропускные сооружения с неизменными сечениями, то, естественно, они на нижних участках будут заноситься наносами. С течением времени процесс занесения распространится вверх по течению, и сооружение целиком выйдет из строя.

Отсюда со всей очевидностью следует, что селепропускные каналы нельзя рассчитывать на чистую жидкость, как это принято в проектной практике. Необходимо иметь в виду, что наличие в воде твердого вещества существенно меняет основные характеристики селепропускных сооружений.

Во избежание занесения сооружения наносами необходимо, чтобы в зависимости от изменения уклона селепропускного канала, его поперечные размеры менялись из расчета сохранения по всей длине постоянной наносотранспортирующей способности потока.

Эта задача сводится к следующему: найти плановое очертание и изменение глубины вдоль течения непризматического селеопасного канала с переменным уклоном дна, при котором по всей длине канала обеспечивается постоянная наносотранспортирующая способность потока.

Напишем уравнения движения и транспортирующей способности наносонесущего потока в непризматическом канале [1]

$$\frac{V}{g} \frac{dV}{dx} = \frac{dz}{dx} - \frac{V^2}{C^2 R} - \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

$$s = \frac{Kv^3}{k}; \quad (K = \text{const}). \quad (2)$$

Положительное направление  $x$  принято по течению;  $-\frac{dz}{dx} = i(x)$  — уклон дна канала;  $s$  — мутность. Остальные обозначения общеприняты. Полагая в уравнении (2)  $s = \text{const}$  и выражая переменную скорость через постоянный расход и живое сечение, получим:

$$\frac{1}{\omega^2 R} - \frac{x}{\omega^4} = \frac{x_0}{\omega_0^4} = \text{const}, \quad (3)$$

где величины с индексом ноль соответствуют равномерному движению.

Рассмотрим случай, когда поперечное сечение канала прямоугольное. Тогда согласно (3) будем иметь:

$$b - 2h = \frac{x_0}{\omega_0^4} \omega^4. \quad (4)$$

С другой стороны  $b\bar{h} = \omega$ . (5)

Из системы (4) — (5) легко определить безразмерные значения глубины  $\bar{h} = h/h_0$  и ширины  $\bar{b} = b/h_0$  (где  $h_0$  — глубина равномерного течения) в следующем виде:

$$\bar{h} = \frac{k+2}{4} y^4 \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{8k}{(k+2)^2 y^4}} \right); \quad (6)$$

$$\bar{b} = \frac{k+2}{2} y^4 \left( 1 \mp \sqrt{1 - \frac{8k}{(k+2)^2 y^4}} \right). \quad (7)$$

Здесь  $k = b_0/h_0$ ;  $b_0$  — ширина канала при равномерном движении;  $y = \omega/\omega_0$  — безразмерная площадь живого сечения. Далее, выразим левую часть уравнения (1) через  $\omega$ ; второй член в правой части того же уравнения также можно выразить через  $\omega$ , если считать коэффициент Шези постоянным и воспользоваться уравнением (3), и, наконец, последний член в правой части (1) представим как производную (6) по  $x$ . Тогда, оставляя все промежуточные выкладки и переходя к безразмерным величинам, получим следующее дифференциальное уравнение для определения  $y$ :

$$\frac{dy}{dx} \frac{i(x) - i_0 y}{(k+2)y^4 \sqrt{\frac{k}{8y} \frac{(k+2)^2 y^4 - 1}{8k} - \frac{C^2 i_0}{g \left(1 + \frac{2}{k}\right)} \frac{1}{y^3}}} = 1, \quad (8)$$

где  $\bar{x} = x/h_0$ ;  $i_0$  — уклон, соответствующий равномерному движению.

Уравнение (8) совместно с выражениями (6) и (7) дает полное решение поставленной выше задачи.

Ход решения этой системы следующий. Для заданного уклона дна канала  $i(x)$  известны: расход  $Q$ , шероховатость  $n$  и уклон  $i_0$ , соответствующий равномерному движению. Тогда для заданного  $k$  по уравнению равномерного движения легко определяются  $h_0$  и  $b_0$ . Значение коэффициента Шези определяется по одной из существующих формул. Затем из уравнения (8), в котором уже известны все коэффициенты, определяем  $y = y(x)$  и, подставляя последнее в (6) и (7), получаем соответственно  $h(x)$  и  $\bar{h}(x)$ , после чего переходим к размерным величинам и, таким образом, задача решается до конца.

Рассмотрим случай, когда дно канала прямолинейное ( $i = i_0 = \text{const}$ ). Тогда уравнение (8) примет следующий вид:

$$\frac{dy}{dx} = i_0 \frac{1-y}{(k+2)y^2 + \sqrt{\frac{8k}{8y}} \frac{(k+2)^2 y^2 - 1}{k} - \frac{C^2}{g} \frac{i_0}{1 + \frac{2}{k}} \frac{1}{y^3}} \quad (9)$$

Знаменатель этого уравнения при ограниченных значениях  $y$  никогда не обращается в нуль. При положительном знаке корня он принимает положительное, а при отрицательном — отрицательное значение.

Рассмотрим сначала случай, когда знаменатель (9) положителен

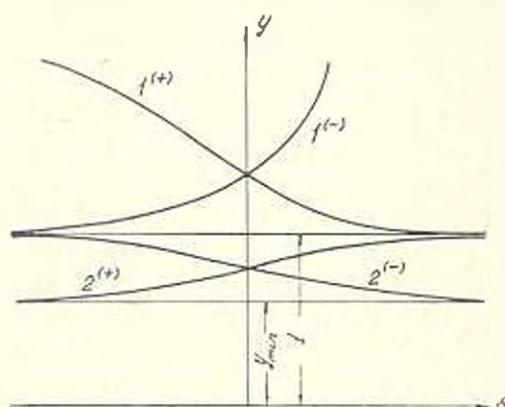


Рис. 1. Кривые зависимости безразмерного живого сечения  $y$  от расстояния  $x$  при постоянном уклоне дна канала

Тогда при  $y > 1$  получим  $\frac{dy}{dx} < 0$

т. е.  $y$  по  $x$  уменьшается, и при  $x \rightarrow \infty$   $y$  стремится к единице, что соответствует равномерному движению (кривая  $f^{(+)}$  на рис. 1); если же  $y < 1$ ,

то  $\frac{dy}{dx} > 0$ , и, следовательно,  $y$

по положительному направлению  $x$  возрастает, стремясь к единице при  $x \rightarrow \infty$ , а по отрицательному направлению абсциссы  $y$  уменьшается до величины

$$y_{\min} = \left| \frac{8k}{(k+2)^2} \right|^{1/7}$$

что следует из уравнения (9) (кривая  $z^{(+)}$  на рис. 1). Таким образом, в случае положительного знака знаменателя (9) кривая  $y = y(x)$  имеет две асимптоты: при  $x \rightarrow -\infty$   $y \rightarrow y_{\min}$  и при  $x \rightarrow \infty$   $y \rightarrow 1$  (см. рис. 1).

Аналогичным образом можно построить кривые  $y = y(x)$  при от-

рицательном знаке знаменателя в уравнении (9). Эти кривые в зависимости от того  $y$  больше или меньше единицы, как и предыдущие, показаны на рис. 1 (кривые  $1^{\circ}$  и  $2^{\circ}$ ). На рис. 2 показаны кривые изменения безразмерной скорости  $\frac{V}{V_0} = \frac{1}{y}$  по  $x$  для случая  $y=1$ .

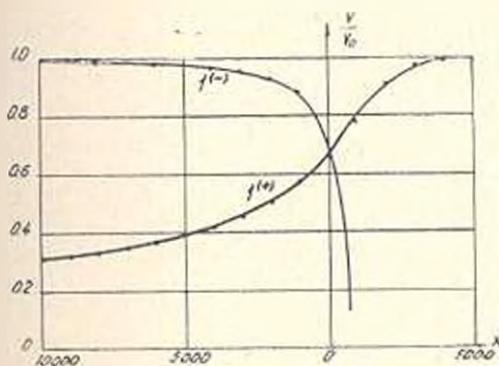


Рис. 2. Кривые зависимости безразмерной скорости  $V/V_0$  от расстояния  $x$  при постоянном угле дна канала

Из рассмотрения кривых на рис. 1 и 2 вытекает следующий неожиданный и, на первый взгляд, парадоксальный факт: в то время, как призматическому каналу с заданной транспортирующей способностью соответствует только один режим движения с безразмерным живым сечением  $y=1$ , непрямоугольному каналу соответствуют четыре режима движения. И далее, что в случае непрямоугольного канала заданную транспортирующую способность можно обеспечить при значительно меньших скоростях, чем в призматическом канале. Этот интересный факт, вытекающий из теоретического решения задачи, может быть использован для проектирования селопропускного канала равной транспортирующей способностью с переменным (уменьшающимся) уклоном дна по течению. Это единственный путь решения поставленной задачи, так как легко доказать, что в условиях призматического канала практически невозможно достичь указанной цели.

Перейдем к рассмотрению течения в непрямоугольном канале, когда уклон его дна меняется по заданному закону. Допустим, что уклон дна канала, имеющий в начале значение  $i_1$ , постепенно уменьшается вниз по течению и принимает значение  $i_0$ . Примем, что закон изменения  $i(x)$  от  $i_1$  до  $i_0$  можно аппроксимировать уравнением

$$i(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} + 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} - 1 \right) \operatorname{th} cx, \quad (11)$$

где  $c$  — параметр, учитывающий характер сопряжения уклонов  $i_1$  и  $i_0$  для конкретных условий местности.

Тогда дифференциальное уравнение (8) для определения безразмерного живого сечения  $y$  примет вид

$$\frac{dy}{dx} = i_0 \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} + 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} - 1 \right) \operatorname{th} cx - y}{(k+2)y^3 + \sqrt{\frac{k}{8y}} \frac{\frac{(k+2)^2}{k} y^2 - 1}}{\sqrt{\frac{1}{8} \frac{(k+2)^2}{k} y^2 - 1}} - \frac{C^2}{g} \frac{i_0}{1 + \frac{2}{k} \frac{y^3}{i_0}}} \quad (12)$$

Из этого уравнения видно, что кривая

$$y = \frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} + 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{i_1}{i_0} - 1 \right) \operatorname{th} cx \quad (13)$$

и прямая

$$y = \left| \frac{8k}{(k+2)^2} \right|^{1/3} \quad (14)$$

являются геометрическим местом экстремумов интегральных кривых (12), т. к. при выполнении (13) и (14) производная  $y$  по  $x$  согласно (12) равняется нулю.

Опуская анализ уравнения (12), перейдем к его решению, принимая следующие значения входящих в него параметров:  $k=1$ ,  $i_0=0,001$ ,  $C=40$ ,  $i_1/i_0=3$ ,  $c=0,001$ . Решение производим численно по методу Рунге-Кутты. Результаты расчетов приведены на рис. 3, причем, знаки, взятые в кружочки, соответствуют знаку знаменателя в

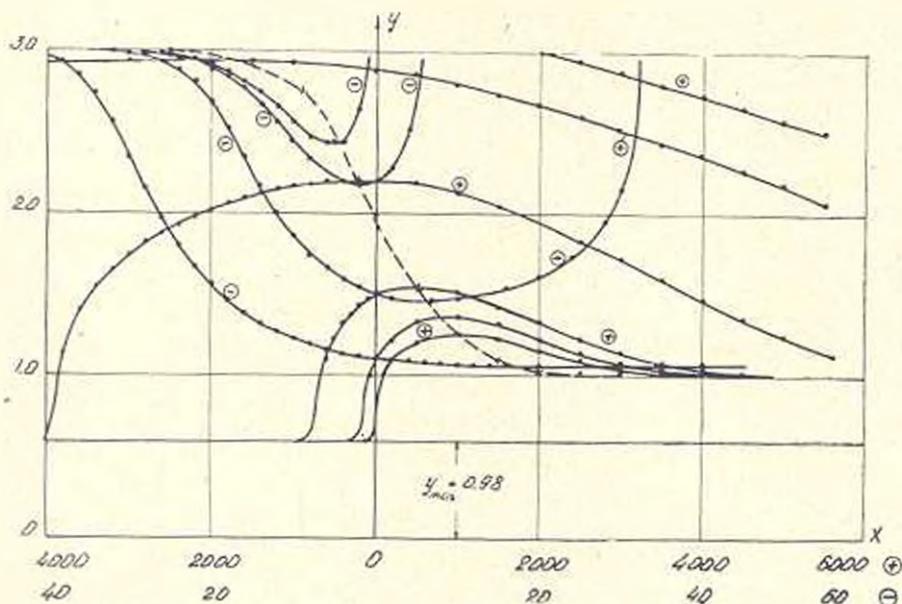


Рис. 3. Кривые зависимости безразмерного живого сечения  $y$  от расстояния  $x$  при переменном уклоне дна канала

уравнению (12). Разные кривые соответствуют различным начальным условиям  $y_0$  (при  $x=0$ ). Пунктирной линией показана кривая (13). На рис. 3 следует, что кривые, соответствующие отрицательному знаку знаменателя (12), имеют асимптоту  $y=i_1 i_0=3$  при  $x \rightarrow -\infty$ . Начиная с этого значения, ординаты этих кривых по положительному направлению  $x$  монотонно уменьшаются до пересечения с кривой (13), откуда они возрастают до бесконечности. Кривые, соответствующие положительному знаку знаменателя, имеют асимптоту вверх по течению

$$y = \left| \frac{8k}{(k+2)^2} \right|^{1/2},$$

так как согласно (12)  $\frac{dy}{dx} = 0$  при этом значении  $y$ . Начиная с этого значения  $y$  ординаты кривых возрастают до точки пересечения с кривой (13), где  $y$  принимает максимальное значение, после чего ординаты кривых монотонно уменьшаются, стремясь к единице при  $x \rightarrow \infty$ .

Имея кривые изменения безразмерного живого сечения  $y$  по  $x$ , по формулам (6) и (7) легко рассчитать безразмерную глубину и ширину канала, и, таким образом, задача решается до конца.

Резюмируя вышесказанное, приходим к следующему.

1. В условиях равномерного движения в призматическом канале для транспортировки определенного количества наносов требуется иметь строго определенный уклон дна и скорость потока, т. е. один режим движения с данным уклоном и скоростью. Если при этом уклоне дна уменьшить скорость, то поток уже не сможет нести указанное количество наносов, и произойдет их отложение. С этой точки зрения совершенно парадоксальный результат получается при рассмотрении наносонесущего потока в условиях неравномерного потока в непризматическом канале. Оказывается, что при заданном уклоне дна определенной транспортирующей способности потока соответствуют четыре режима течения.

2. При одном и том же уклоне дна поток в условиях неравномерного движения может нести данное количество наносов при значительно меньших скоростях, чем в случае равномерного потока.

3. Обеспечить равную транспортирующую способность при переменном уклоне дна в условиях равномерного движения практически невозможно. Для этой цели необходимо использовать непризматический канал, поперечные размеры которого определяются по предложенной в настоящей статье методике.

4. Предлагаемая в настоящей работе методика может быть рекомендована для применения при расчетах и проектировании селепропускных сооружений, особенно при изменяющемся уклоне местности.

## Վ. Չ. ՍԱՆՈՅԱՆ

## ՍԵՎԱԳԱՅԻՆ ՀՈՐԻ ԱՆՀԱՂԱՍԻՐԱԶՈՒ ՇԱՐՃՈՒՄԸ ԳՈՒՌՆԱԿԱՆ ՀԱՏԱԿԱՅԻՆ ԲԵՐՈՒԹՅՈՒՆ ՈՒՆԵՑՈՂ ՈՉ-ՊՐԵՉՄԱՏԻՆ ՀՈՒՆԵՐՈՒՄ

## Ա մ փ ա փ ա մ

Հողվածում սրվում է սելավախող կառուցվածքների հաշվարկման մեթոդային գեղարվեստական, երբ նրանց հասակի թերությունը փոփոխական է և փոքրանում է ըստ հոսանքի ուղղության: Լուծան կառուցվածքների նորմալ աշխատանքը ապահովելու համար պետք է նրանց բանական չափերը բնորոշ այնպես, որ, ընայած հասակի թերության փոքրացմանը, նրանց կոշտ մասնիկների սանդղանակությունը չփոփոխվի: Այս խնդիրը լուծելու համար սղաս-դործվում են սեւավազասարքային շարժման (1) և հոսանքի սանդղանակության (2) հավասարումները, որոնց միջոցով առաջվում է կառուցվածքի չափազուրկ կենդանի կտրվածքը (3) սրոշելու համար (8) դիֆերենցիալ հավասարումը: Որոշվում է չափազուրկ ի խորությունը ու ի չափությունը և ալյախսով խնդիրը լուծվում է մինչև վերջ:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Симоян В. Г. Определение транспортирующей способности потока применительно к напорному гидротранспорту. Труды координационных совещания по гидротехнике, вып. 57. Изд. «Энергия», 1971.
2. Sanoyan V. G. Calculation of the process of sedimentation and hydraulic washout of river reservoir. 14-th IAHR, 29 august-3 september, Paris, 1971, vol. 5, p. p. 5-9.
3. Симоян В. Г. Расчет процесса заиления русловых водохранилищ. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. 21, № 2, 1971.