

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Н О ТОКМАԼԵԿԻ

К ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПЛАВНЫХ
ПЕРЕЛОМОВ ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ

1 Дифференциальное уравнение неравномерного движения жидкости в открытых руслах, имеющее вид

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{\alpha C^2 R}{g \omega} \frac{\partial \omega}{\partial l} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial h}} \quad (1)$$

относится к случаям малых геометрических уклонов. При этом живое сечение заменяется вертикальным сечением потока, а геометрический уклон настолько мал, что можно принимать $i_0 = \sin \varepsilon = \operatorname{tg} \varphi$; $\cos \varepsilon = 1$. Такая постановка в обычных каналах приводит к незначительной ошибке.

В ряде случаев участки каналов могут иметь весьма большие прямые (быстротоки) и обратные (консольные перепады) уклоны. Для этих случаев надо отказаться от указанной выше расчетной схемы и живые сечения потока принять нормальными ко дну русла с глубиной h (рис. 1).

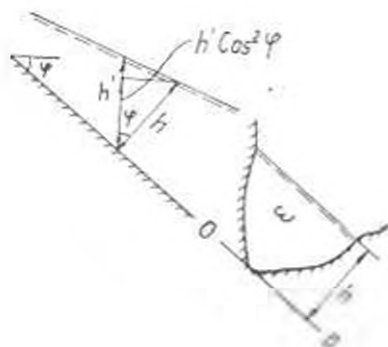


Рис. 1

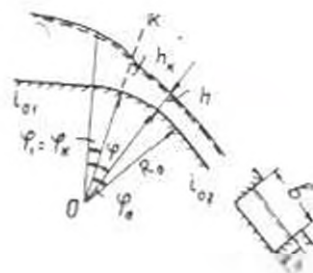


Рис. 2

В данной постановке, поступая аналогично выводу дифференциального уравнения неравномерного движения [1], дифференциальное уравнение движения получается в виде [2]

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\sin \varphi - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{\omega C^2 R}{g \omega} \frac{d\omega}{dl} \right)}{\cos \varphi - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^2} \frac{d\omega}{dh}} \quad (2)$$

Легко убедиться, что структура уравнения (2) ничем не отличается от структуры (1), и все известные методы приближенного интегрирования (1) пригодны и для (2).

На наш взгляд в современных условиях надо отказаться от всех существующих, зачастую с грубыми допущениями, примитивных и трудоемких методов расчета, предпочитая интегрирование (1) и (2) на ЭВМ, что более точно и проще.

Наши исследования показали, что в результате интегрирования (2) значения h и h' (см. рис. 1) заметно отличаются только при глубинах, близких к критической. Однако из этого не следует, что кривые свободной поверхности вне этой области будут одинаковые, так как h' откладывается вертикально, а h — по нормали, и отклонение их ординат примерно составляет $1 - \cos^2 \varphi$, что значительно при больших уклонах.

2. Когда уклон русла резко изменяется, переходя от меньшего критического к большему, то теоретически в сечении перелома образуется критическая глубина, и кривая свободной поверхности типа b , асимптотично приближается к нормальной глубине.

Когда перелом дна осуществляется плавной кривой значительного радиуса, то в начале кривой не устанавливается критическая глубина, так как в этом сечении l_0 еще меньше критического.

По ходу движения уклон русла возрастает, и когда $l_0 = l_k$ имеем $h = h_k$. При больших уклонах критическая глубина определяется из уравнения

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega^3 \cos \varphi}{B} \quad (3)$$

Расход, выраженный через гидравлические элементы, соответствующие критическому уклону, будет:

$$Q = \omega C \sqrt{R \sin \varphi} \quad (4)$$

При прямоугольном сечении русла выражения (3) и (4) примут вид:

$$h = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2 \cos \varphi}}; \quad Q^2 = \frac{b^2 h^{2y+3} \sin \varphi}{n^2 \left(1 + 2 \frac{h}{b} \right)^{2y+1}} \quad (5)$$

где y — показатель в формуле Павловского [1].

Характерно, что в (5) не участвуют радиус кривизны и уклоны участков.

Решая систему (5), определяется место критического сечения φ_k и значение критической глубины h_k (рис. 2). Надо отметить, что точное определение φ_k и h_k очень важно, так как здесь кривая свободной поверхности имеет точку перегиба и происходит изменение характера кривой. Полученные значения φ_k и h_k являются исходными координатами для построения кривой свободной поверхности в спокойном и бурном режимах движения.

В случае $i_{02} < \sin \varphi_k$ глубина не доходит до критической и поток остается спокойным, при $i_{01} > \sin \varphi_k$ поток в начальном сечении имеет глубину меньше критической и на всех участках режим бурный.

3. Рассмотрим переходный участок призматического прямоугольного русла от $i_{01} < i_k$ к $i_{02} > i_k$ при плавном переходе для окружности радиуса R_0 (центральный угол φ_0). Для составления дифференциального уравнения движения удобно за переменные принять: φ — угол между вертикалью и данным сечением, h — глубина потока по нормали.

$$\text{Учитывая, что } \omega = bh; \quad \gamma = b + 2h; \quad R = \frac{h}{1 + 2 \frac{h}{b}}; \quad C = \frac{1}{n} R \gamma;$$

$$dl = R_0 d\varphi; \quad \frac{d\omega}{dl} = 0; \quad \frac{d\omega}{dh} b,$$

из (2) получим:

$$\frac{dn}{d\varphi} = R_0 \frac{\sin \varphi - \frac{Q^2 n^2}{b^2 h^{2y+1}} \left(1 + \frac{2h}{b}\right)^{2y+1}}{\cos \varphi - \frac{\alpha Q^2}{g b^2 h^3}} \quad (6)$$

Граничными условиями будут: $\varphi = \varphi_k; h = h_k$.

Интегрируя (6) на ЭВМ в пределах от φ_k до $\varphi_k + \varphi_0$, получим координаты кривой свободной поверхности.

На рис. 3 показана теоретическая кривая свободной поверхности

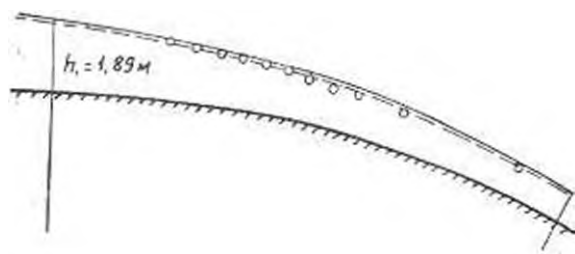


Рис. 3

при следующих исходных данных: $Q = 46,8 \text{ м}^3/\text{сек}$; $b = 6 \text{ м}$; $R_0 = 30 \text{ м}$; $\varphi_0 = 0,4517$; $i_{01} = 0,004$; $i_{02} = 0,49$; $n = 0,017$; $\alpha = 1,1$; $2y = 0,391$; $\varphi_* = 0,00397$; $h_* = 1,89 \text{ м}$. Там же кружочками показаны опытные точки, полученные на модели. Среднеквадратичное отклонение глубин составляет 3,2%.

4° Пусть ширина прямоугольного канала (рис. 4) линейно рас-

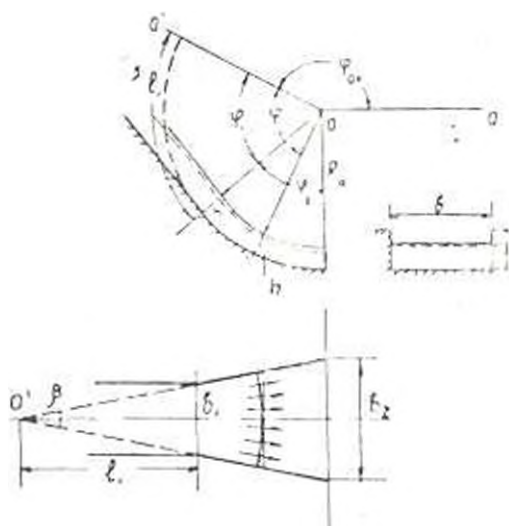


Рис. 4.

ширяется по длине криволинейного участка радиуса R_0 (центральный угол φ_0). Для построения кривой свободной поверхности здесь удобно пользоваться координатами φ и h . За начало отсчета угла φ (рис. 4) принимаем линию мысленного пересечения боковых бортов $O-O'$ (которая проходит через центр кривизны). Тогда для гидравлических элементов получим: $b = \beta R_0 \varphi$; $s = \beta R_0 \varphi^2$; $l = \beta R_0 \varphi + 2h$.

$$R = \frac{h}{1 + \frac{2h}{\beta R_0 \varphi}}; \quad C = \frac{1}{n} \left(\frac{h}{1 + \frac{2h}{\beta R_0 \varphi}} \right)^y; \quad \frac{\partial s}{\partial l} = \beta h; \quad \frac{\partial s}{\partial l} = \beta R_0 \varphi,$$

где $\beta = \frac{b_2 - b_1}{R_0 \varphi_0}$ — центральный угол в плане.

Учитывая эти преобразования, уравнение (2) получит вид:

$$\frac{dh}{d\varphi} = \frac{R_0 \cos(\varphi_{01} + \varphi) + \frac{\alpha Q^2}{g \beta^3 R_0^3 \varphi^3 h^3} \left| \frac{g n^2 R_0}{\alpha h^{2y}} \left(1 + \frac{2h}{\beta R_0 \varphi} \right)^{2y-1} \frac{h}{\varphi} \right|}{\sin(\varphi_{01} + \varphi) + \frac{\alpha Q^2}{g \beta^3 R_0^3 \varphi^3 h^3}} \quad (7)$$

где φ_{01} — угол между начальным сечением и линией отсчета $O-O'$.

Интегрируя (7) на ЭВМ от φ_1 до $\varphi_1 - \varphi_0$ (где $\varphi_1 = \frac{b_1}{3R_0}$), получим координаты кривой свободной поверхности.

Пример. Построить кривую свободной поверхности при исходных данных: $Q = 112 \text{ м}^3/\text{сек}$; $h_1 = 0,85 \text{ м}$; $\varphi_0 = 0,4556$ ($26^\circ 06' 34''$); $R_0 = 40 \text{ м}$; $n = 0,017$; $\alpha = 1,1$; $b_2 = 8,04 \text{ м}$; $b_1 = 6,0 \text{ м}$.

Определяем параметры: $\beta = 0,119$; $\varphi_1 = 1,340$; $\varphi_{01} = 2,916$; $\varphi_2 = 1,79$; $2y = 0,391$.

Интегрируя (7) на ЭВМ, получаем координаты кривой свободной поверхности, приведенные в табл. 1 (где x — длина горизонтальной проекции дуги).

Таблица 1

φ	1.34	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.79
$x, \text{ м}$	0	1.81	4.05	5.95	7.87	9.80	11.80	13.80	17.40
$h, \text{ м}$	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70	0.68	0.67	0.64

Выводы

1. При гидравлическом расчете каналов больших уклонов или с криволинейным дном исходным надо принимать дифференциальное уравнение (2) а не (1).

2. Граничными условиями интегрирования (2) для прямоугольных русел с криволинейным дном являются корни системы (5).

3. Кривую свободной поверхности для призматического и непризматического участков с криволинейным дном удобно получить с помощью интегрирования (2) на ЭВМ, применяя в качестве координат центральный угол φ и глубину потока по нормали h .

ГрПИ им. К. Маркса

Поступило 29 I 1975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика, М., 1965.
2. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов, М., 1969.