

можно лишь при малых напорах (перепадах) и в момент перехода к напорному движению. При этом суммарная сила давления, направленная наружу, возникает в основном на выходном участке и достаточно мала.

При проектировании конструкции стыков необходимо учесть указанное распределение сил давления и подобрать наиболее эффективные решения, учитывающие, что стыки в разных местах по длине трубы будут выполнять разные функции в зависимости от величины и направления потока через стыки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтунин В.И. Гидравлические исследования сооружений с гладкими и гофрированными трубами. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1977. — 24 с. 2. Кунцевич Н.М. Гидравлические исследования башенных водосбросов рыбноводных прудов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1970. — 25 с. 3. Обухов А.Г. Работа строительных туннелей с переменным режимом течения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. — 16 с. 4. Гатилло С.П., Филиппович И.В. О целесообразности применения треугольной и полукруглой геометрических форм трубчатых водосбросов // Докл. ВАСХНИЛ. 1981. — № 1. — С. 38—40. 5. Руководство по проектированию и гидротехническому расчету регулирующих мелиоративных сооружений. Минск, 1984. — 96 с.

УДК 627.83:627.421

В.М.ЛАРЬКОВ, канд. техн. наук (БСХА)

О ГИДРАВЛИКЕ РЕШЕТЧАТЫХ ВОДОСЛИВОВ

Решетчатые (щелевые) конструкции широко применяются в гидротехнических сооружениях в качестве водозаборных, наносо- и сороудерживающих устройств, а также в качестве гасителей энергии потока [1*, 2].

Гидравлика этих устройств зависит от их конструкции, условий работы, назначения. Задачи расчета могут иметь прямые и обратные решения. Например, для принятой конструкции и заданных размеров решетки необходимо определить: расход, пропускаемый через решетку; свободную поверхность, глубину и скорость транзитного потока в расчетном створе.

В ряде случаев необходимо по заданным параметрам потока подобрать размеры и конструкцию решетки.

В данной работе рассматривается гидравлика решетчатых водосливов с большим уклоном при безнапорной работе камеры и неподтопленном режиме работы со стороны нижнего бьефа.

Рассматривая гидравлическую работу решетки как систему с переменной массой (рис. 1, а) и исходя из условия неразрывности плоского потока, можно записать

$$dq_p + dq_T = 0, \quad (1)$$

где q_p и q_T — соответственно часть расхода, протекающая через решетку и проходящая по ней сверху (транзитом).

Поскольку

$$q_p = f(x; t) \text{ и } q_T = f(x; t),$$

* А. с. СССР № 1019050.

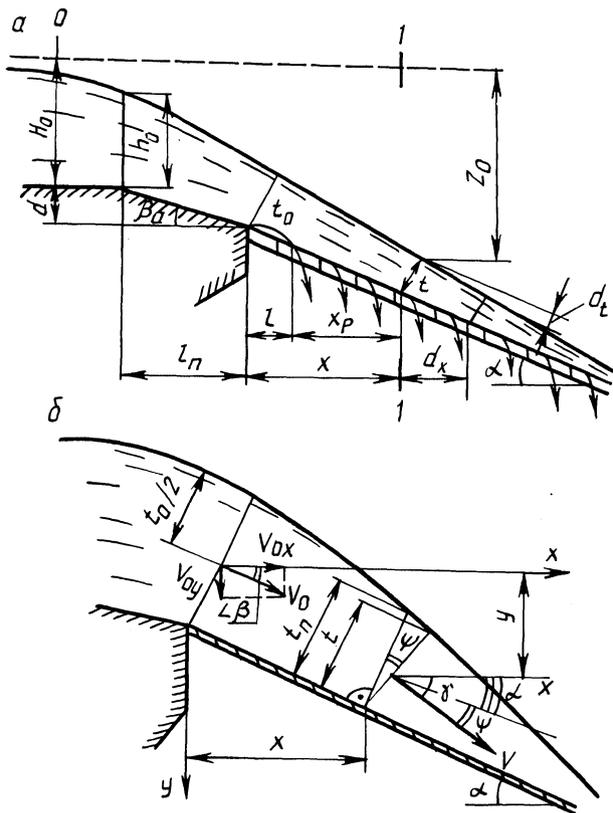


Рис. 1. Гидравлическая модель решетчатых водосливов

где t — нормальная глубина потока, имеем:

$$dq_T = \frac{\partial q_T}{\partial x} dx + \frac{\partial q_T}{\partial t} dt;$$

$$dq_P = \frac{\partial q_P}{\partial x} dx + \frac{\partial q_P}{\partial t} dt.$$

Подставляя dq_T и dq_P в (1), получим

$$\frac{\partial q_T}{\partial x} + \frac{\partial q_P}{\partial x} dx + \frac{\partial q_P}{\partial t} + \frac{\partial q_T}{\partial t} dt = 0$$

или

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\frac{\partial q_T}{\partial x} + \frac{\partial q_P}{\partial x}}{\frac{\partial q_T}{\partial t} - \frac{\partial q_P}{\partial t}}.$$

(2)

Для решения (2) определим:

1. Транзитный расход

$$q_T = Vt, \quad (3)$$

где V — средняя скорость потока в расчетном сечении.

Из уравнения Бернулли, записанного для сечений 0—0 и 1—1 (рис. 1)

$$\frac{V^2}{\varphi^2 2g} = z - t \cos \alpha, \quad (4)$$

где

$$V = \varphi \sqrt{2g (H_0 + d + x \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha)}.$$

Тогда

$$q_T = \varphi \sqrt{2gz}t. \quad (5)$$

Обозначив

$$\lambda_t = \frac{t}{H_0}; \quad \lambda_x = \frac{x}{H_0}; \quad \lambda_d = \frac{d}{H_0}; \quad \lambda_{t_0} = \frac{t}{H_0},$$

$$\lambda_z = 1 + \lambda_d + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha - \lambda_t \cos \alpha$$

и произведя замену в (5), получим

$$q_T = \varphi \sqrt{2g} \lambda_t \sqrt{\lambda_z} H_0^{3/2}, \quad (6)$$

где α — угол наклона плоскости решетки к горизонту.

2. Расход через решетку.

В гидравлическом отношении щели, устроенные на водосливе, работающие в напорном режиме, для которого справедлива зависимость

$$q_p = \mu \rho \sqrt{2g} \sqrt{P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}}} (x - l), \quad (7)$$

где μ — коэффициент расхода решетки; $\rho = \frac{S}{S+d}$ — коэффициент, определяющий площадь живого сечения решетки; $P_{\text{ст}}$ — гидростатическое давление потока; $P_{\text{дин}}$ — гидродинамическое давление потока; $x - l$ — расчетная рабочая длина решетки; S и d — соответственно ширина просвета и толщина элемента решетки.

При движении потока по наклонной плоскости

$$P_{\text{ст}} = t \cos \alpha; \quad (8)$$

$$P_{\text{дин}} = \kappa \frac{V^2}{2g} \sin \psi, \quad (9)$$

$$\psi = \gamma - \alpha, \quad (10)$$

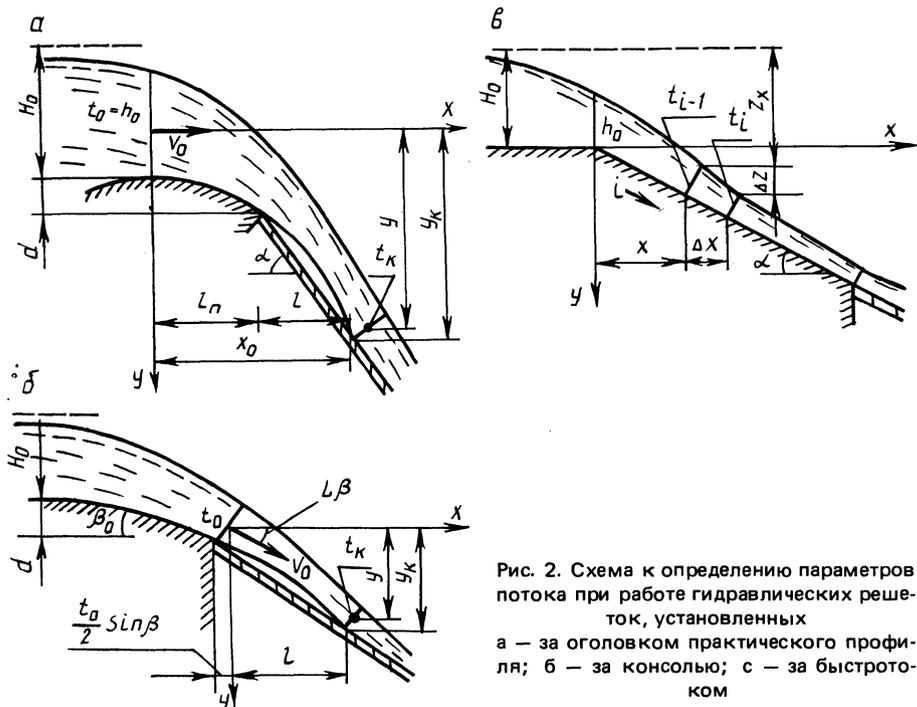


Рис. 2. Схема к определению параметров потока при работе гидравлических решеток, установленных а — за оголовком практического профиля; б — за консолью; с — за быстроходом

где ψ — угол между вектором скорости и плоскостью решетки (рис. 2); V — средняя скорость набегания потока; γ — угол между вектором скорости и горизонтом (осью X); κ — коэффициент динамического давления. С учетом (3–5)

$$P_{\text{дин}} = \kappa \frac{q_T^2}{2gt^2 \cos^2 \psi} \cdot \sin \psi. \quad (11)$$

Решая совместно (7–11) с учетом замен для λ , вместо (7) получим

$$q_p = \mu \rho \sqrt{2gH_0}^{3/2} \sqrt{\kappa \varphi^2 \lambda_z \frac{\text{tg } \psi}{\cos \psi} + \lambda_t \cos \alpha (\lambda_x - \lambda_1)}. \quad (12)$$

3. Определение углов ψ и γ .

В расчетном сечении значение угла γ можно определить из условия (рис. 1, б)

$$\text{tg } \gamma = \frac{V_y}{V_x}. \quad (13)$$

Здесь

$$V_x = \varphi V_0 \cos \beta; \quad (14)$$

$$V_y = V_0 \sin \beta + \varphi \sqrt{2g \frac{t_0}{2 \cos \beta} + x \operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{2} \cos \alpha}, \quad (15)$$

где β — угол между горизонтом и вектором скорости в начальном сечении.
Решая совместно (13–15), получим

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \beta \frac{1}{\varphi} + \frac{\sqrt{g} \sqrt{(t_0 - t) \cos \alpha + 2x \operatorname{tg} \alpha}}{V_0 \cdot \cos \beta}.$$

В начале решетки средняя скорость

$$V_0 = \frac{q_0}{t_0}.$$

Для водослива

$$q_0 = m_1 \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (16)$$

где $m_1 = m \epsilon \sigma_n$ — приведенный коэффициент расхода. Тогда с учетом (13–16)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\lambda_{t_0} \sqrt{(\lambda_{t_0} - \lambda_t) \cos \alpha + 2\lambda_x \operatorname{tg} \alpha}}{\sqrt{2} m_1 \cos \beta} + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\varphi}.$$

Значение угла ψ определяется из условия (10).

Нормальная глубина потока в расчетном створе может быть выражена через глубину, измеренную нормально к поверхности решетки (рис. 1, б),

$$t = t_H \cos \psi.$$

4. Решение дифференциальной системы (2).

Рассматривая совместно (2), (6) и (11), имеем:

$$\frac{\partial q_T}{\partial \lambda_x} = \varphi \sqrt{2g} H_0^{3/2} \frac{\lambda_t \operatorname{tg} \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_T}{\partial \lambda_t} = \varphi \sqrt{2g} H_0^{3/2} \left(\sqrt{\lambda_z} - \frac{\lambda_t \cdot \cos \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}} \right). \quad (18)$$

Аналогично уравнение (12) в частных производных при $\alpha = \operatorname{const}$ будет:

$$\frac{\partial q_p}{\partial \lambda_x} = \mu \rho \sqrt{2g} H_0^{3/2} \left[\sqrt{A} + \frac{k\varphi^2 (\lambda_x - \lambda_p)}{2\sqrt{A}} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \psi} \right]; \quad (19)$$

$$\frac{\partial q_p}{\partial \lambda_t} = \mu \rho \sqrt{2g} H_0^{3/2} (\lambda_x - \lambda_t) \frac{\cos \alpha - k\varphi^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \psi} \left(\operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2} \right)}{2\sqrt{A}}. \quad (20)$$

где

$$A = \lambda_t \cos \alpha + k \varphi^2 \lambda_z \frac{\operatorname{tg} \psi}{\cos \psi} ;$$

$$B = \frac{\lambda_{t0}^2 \lambda_z}{2m_1^2} \frac{(1 + \sin^2 \psi) \cos^2 \gamma}{\cos^2 \psi \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \beta)} . \quad (21)$$

После подстановки выражений (17–18), (21) в уравнение (2) и преобразований получим:

$$\frac{d\lambda_t}{d\lambda_x} = - \frac{\varphi \lambda_t \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}} + \mu \rho \sqrt{A} + \frac{\mu \rho k \varphi^2 (\lambda_x - \lambda_l) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \psi} (\operatorname{tg} \psi + B)}{2\sqrt{A}}}{\varphi (\sqrt{\lambda_z} - \frac{\lambda_t \cos \alpha}{2\sqrt{\lambda_z}}) + \mu \rho (\lambda_x - \lambda_l) \frac{\cos \alpha - k \varphi^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \psi} (\operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2})}{2\sqrt{A}}} ,$$

или

$$\frac{d\lambda_t}{d\lambda_x} = - \frac{\varphi \lambda_t \sqrt{A} \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2\mu \rho \sqrt{\lambda_z} A + \operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg} \psi + B) C_1}{\varphi (2\sqrt{\lambda_z} - \lambda_t \cos \alpha) \sqrt{A} + \mu \rho (\lambda_x - \lambda_l) \sqrt{\lambda_z} \cos \alpha - (\operatorname{tg} \psi + \frac{B}{2}) C_1} , \quad (22)$$

$$\text{где } C_1 = \mu \rho k \varphi^2 (\lambda_x - \lambda_l) \sqrt{\lambda_z} \frac{1}{\cos \psi} .$$

Для решения системы (22) необходимо определить также (рис. 1) длину нерабочей части решетки l (длину отлета струи), глубину потока h_0 в начальном сечении $0-0$, толщину струи t_0 в начале решетки, толщину струи t_k в створе касания струи с решеткой.

Необходимость определения величины t_k возникает при возможном отрыве струи от сливной грани. При $l = 0$, $t_k = t_0^k$.

5. Определение толщины струи на нерабочем участке решетки (свободного падения),

Свободное падение струи наблюдается при отрыве потока от сливной поверхности. Это может быть при работе решетки за водосливом практического профиля, с широким порогом и т.п., если угол наклона решетки больше угла вылета (схода) струи (рис. 2), т.е. когда $l > 0$, а угол $\beta < \alpha$. На этом участке расход $q_T = q_0$; $q_D = 0$.

Для данных условий в любом расчетном створе толщина сплошной струи $t = q_0 / V$, а средняя скорость

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} . \quad (23)$$

Вертикальная составляющая вектора скорости (рис. 1)

$$V_y = V_0 \sin \beta + \varphi \cdot \sqrt{2gy} . \quad (24)$$

Для определения ординаты y воспользуемся следующим уравнением:

$$x = \frac{V_0}{g} \cos\beta (\sqrt{V_0^2 \sin^2\beta + 2gy} \pm V_0 \sin\beta), \quad (25)$$

полученным для описания траектории центральной струйки свободного падающего потока.

При положительном значении угла β

$$y = \frac{gx^2}{2V_0^2 \cos^2\beta} + x \operatorname{tg}\beta. \quad (26)$$

Решая совместно (23), (24), (26) и учитывая, что $V_0 = a_0/t_0$; $t = a_0/V$; $V_x = V_0 \cdot \cos\beta$, имеем:

$$t = \frac{t_0 a_0}{\sqrt{a_0^2 + 2\varphi t_0 \sqrt{P} \operatorname{tg}\beta + P} \frac{\varphi^2 t_0^2}{a_0^2 \cos^2\beta}},$$

где $P = gt^2 x (gx t_0^2 + a_0^2 \sin 2\alpha)$.

В безразмерных параметрах

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{t_0}}{\sqrt{1 + 2\varphi \operatorname{tg}\beta \sqrt{\lambda_p} + \frac{\varphi^2 \lambda_p}{\cos^2\beta}}}, \quad (27)$$

$$\text{где } \lambda_p = \frac{\lambda_{t_0}^2 \lambda_x^2}{2m_1^2} \left(\frac{\lambda_{t_0}^2}{2m_1^2} + \frac{\sin 2\beta}{\lambda_x} \right).$$

При $\beta = 0$

$$\lambda_t = \frac{2m_1^2 \lambda_{t_0}}{\sqrt{4m_1^4 + \varphi^2 \lambda_{t_0}^4 \lambda_x^2}}$$

Для случая, когда решетка установлена за водосливом практического профиля (рис. 2, а), $\lambda_{t_0} = \lambda_{h_0}$. При этом значение λ_{h_0} будет переменным и зависит от полноты напора на пороге водослива. По экспериментальным исследованиям

$$\lambda_{h_0} = (0,56 - 0,78) H_0.$$

6. Определение глубины при движении потока по сплошной наклонной плоскости (на быстротеке).

Этот случай наблюдается при устройстве решетки в конце длинной консоли или быстротока (рис. 2, б; 2, с).

Используя уравнение неразрывности и уравнение Бернулли, имеем:

$$\frac{q_0^2}{\varphi^2 2gz} = \frac{m^2 H_0^3}{\varphi^2 z},$$

где $z = H_0 + x \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha$.

Обозначим

$$z_x = H_0 + x \operatorname{tg} \alpha,$$

или в безразмерных параметрах

$$\lambda_{zx} = 1 + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha.$$

Тогда

$$\lambda_t^3 - \frac{\lambda_{zx}}{\cos \alpha} \lambda_t^2 + \frac{1}{\cos \alpha} \left(\frac{m_1}{\varphi} \right)^2 = 0. \quad (28)$$

Анализ кубического уравнения (28) показывает, что решение имеет физический смысл при

$$\lambda_{zx} > 3 \left(\frac{1}{2} \frac{m_1}{\varphi} \cos \alpha \right)^{2/3}.$$

После соответствующих преобразований (28) получим следующую зависимость:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{zx}}{3 \cos \alpha} \left\{ 1 - 2 \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(1 - \frac{27}{2} \frac{\left(\frac{m_1}{\varphi} \cos \alpha \right)^2}{\lambda_{zx}^3} \right) + \frac{\pi}{3} \right] \right\}, \quad (29)$$

которая справедлива при условии

$$\frac{m_1}{\varphi} < \frac{\lambda_{zx}}{\cos \alpha} \left[\frac{2}{27} \lambda_{zx} \left\{ 1 - \cos \left[3 \arccos \frac{1}{2} \left(\frac{3 \cos \alpha}{\lambda_{zx}} - 1 \right) \right] \right\} \right].$$

Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gz_x}}.$$

Коэффициент Шези

$$C = \frac{V}{\sqrt{RI}},$$

откуда при одинаковых V :

$$\varphi = \frac{C\sqrt{RI}}{\sqrt{2gz_x}} = C\sqrt{\frac{RI}{2gz_x}},$$

или

$$\varphi = C \sqrt{\frac{R}{2g}} \sqrt{\frac{\sin \alpha}{H_0 + x \operatorname{tg} \alpha}} = \sqrt{\frac{C \sin \alpha}{2g}} \sqrt{\frac{\lambda_R}{1 + \lambda_x \operatorname{tg} \alpha}}.$$

Подставляя значения φ в (29), получим

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{zx}}{3 \cos \alpha} \left\{ 1 - 2 \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(1 - 27 \frac{g m_1^2 \cos \alpha}{C^2 \lambda_R \lambda_{zx}^2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{\pi}{3} \right] \right\}. \quad (30)$$

7. Определение длины нерабочей части решетки (отлета струи).

Длина нерабочей части решетки (рис. 2) определяется положением решетки и траекторией нижней границы потока. Положение решетки может быть задано начальными координатами и углом наклона, а траектория струи — граничной линией потока, уравнением (25).

Приведем решение поставленной задачи для двух случаев: первый — гидравлическая решетка установлена за водосливом практического профиля (рис. 2, а), второй — решетка установлена за водосливом с широким порогом или консолью (рис. 2, б).

В первом случае начало координат расположено в центре живого сечения, взятом на гребне водослива. Из рис. 2, а

$$y_{\kappa} = y + \frac{t}{2} \cos \alpha, \quad (31)$$

или

$$y_{\kappa} = \frac{h_0}{2} + d + l \operatorname{tg} \alpha. \quad (32)$$

При $\beta = 0$; $x = x_0 = l + l_n$; $t_0 = h_0$;

$$y = \frac{g x_0^2}{2 V_0^2} = \frac{g x_0^2 h_0^2}{2 q_0^2}. \quad (33)$$

Решая совместно (31–33), получим:

$$\frac{g x_0^2}{V_0^2} - 2 x_0 \operatorname{tg} \alpha + 2 l_n \operatorname{tg} \alpha - h_0 - 2d + t \cos \alpha = 0. \quad (34)$$

Обозначив

$b = h_0 + 2d - 2l_n \operatorname{tg} \alpha - t \cos \alpha$, уравнение (34) запишем так:

$$x_0^2 - \frac{2 x_0 V_0 \operatorname{tg} \alpha}{g} - \frac{V_0^2}{g} b = 0. \quad (35)$$

Решая (35) относительно x_0 , получим

$$x_0 = \frac{V_0^2}{g} \operatorname{tg} \alpha \left(1 + \sqrt{1 + \frac{gb}{V_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right),$$

или

$$x_0 = \frac{q_0^2}{gh_0^2} \operatorname{tg} \alpha \left(1 + \sqrt{1 + \frac{gbh_0^2}{q_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right). \quad (36)$$

В безразмерных параметрах (36) имеем:

$$\lambda_{x_0} = \frac{2m_1^2 \operatorname{tg} \alpha}{\lambda_{h_0}^2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda_b \lambda_{h_0}^2}{2m_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right). \quad (37)$$

Выполнив аналогичные решения для второго случая, когда начало координат расположено в центре живого сечения, принятом в конце консоли (рис. 2, б), где $V_{0x} \neq V_0$, $V_{0y} = V_0$, получим

$$y_k = y + \frac{t}{2} \operatorname{cosa} = \frac{t_0}{2} + t \operatorname{tg} \alpha.$$

В соответствии с (26)

$$y = \frac{g l^2}{2V_0^2 \cos^2 \beta} + t \operatorname{tg} \beta.$$

Тогда

$$\frac{g l^2}{2V_0^2 \cos^2 \beta} + t \operatorname{tg} \alpha + \frac{t}{2} \operatorname{cosa} - \frac{t_0}{2} - t \operatorname{tg} \beta = 0,$$

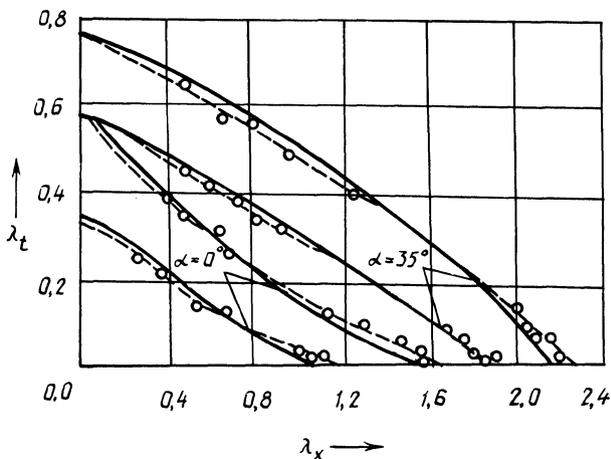


Рис. 3. Графики зависимости $\lambda_t = f(\lambda_x)$:
 - - - теоретическая зависимость; — — — опытные данные

или

$$l^2 + 2l \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) - \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (t_0 - t \cos \alpha) = 0.$$

Отсюда

$$l = \frac{V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) \left(\sqrt{1 + \frac{g(t_0 - t \cos \alpha)}{V_0^2 \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)}} - 1 \right).$$

При выполнении гидравлических расчетов решетчатых водосливов необходимо правильно оценить особенности работы решетки и с учетом этого выбрать начальные условия и способы определения исходных параметров: положение осей координат, начальную глубину потока, длину нерабочей части решетки, ее уклон, конструкцию и т.д. Затем, используя зависимость (27), определить положение свободной поверхности (глубину) транзитного потока. Имея связь $t = f(x)$ в численном виде, можно определить транзитный расход в расчетном створе x_p , используя зависимость (12). Расход решетки длиной x_p составит $q_p = q_0 - q_T$.

Учитывая трудоемкость, решение данной гидравлической задачи целесообразно выполнять с использованием ЭВМ. Для облегчения расчетов была разработана программа расчета на ЭВМ ЕС-1020.

На основании полученных расчетных данных составлены графики, удобные для практического использования.

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных (рис. 3) указывает на хорошую сходимость. Некоторые отклонения, относящиеся к небольшой глубине транзитного потока (при $t \leq 1-1,5$ см), можно объяснить нарушением условий автомодельности в результате неучета сил поверхностного натяжения (числа W_1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Л а р ь к о в В.М. Водосливная плотина облегченного типа на р. Быстрая, Горки, БССР. — 1985. — 4 с.
2. Руководство по гидравлическим и русловым расчетам речных гидроузлов. М., 1980. — 12 с.

УДК 532.525.2

И.В.ПОВОРОТНЫЙ, Д.А.ПРОКОПЧУК,
Д.А.КОЗЛОВ, канд.-ты техн. наук (БПИ)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСАДКОВ НА РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

Биологическое обрастание плавучих морских буровых установок, элементов приливных гидроэлектростанций, корпусов судов ухудшает условия их функционирования. В связи с этим ведутся исследования по разработке и применению наиболее надежных и экономичных способов средств защиты подводных сооружений и конструкций от биологического обрастания.

Цель данной работы: исследование влияния параметров насадков и огра-