

УДК 626-33

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ ГИДРОУЗЛА

Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола,  
e-mail: PozdeevAG@volgatech.net, KuznetsovaYA@volgatech.net

Произведен расчет сопряжения бьефов водосливной плотиной с водосливом практического профиля в пространственных условиях в прикладной программной среде MathCAD. На основании кривой связи расходов в нижнем бьефе гидроузла с уровнями воды на ближайшем водомерном посту построена сплайн-интерполяция зависимости уровня от расхода. Рассчитаны параметры свободного растекания потока в отводящем русле за водосливной плотиной. Установлены значения коэффициента сжатия струи и рассчитаны первая сопряженная глубина и глубина в сжатом сечении. Найдены предельная бытовая глубина, обеспечивающая свободное растекание, и глубина, при которой появляется совершенный прыжок в конце листовидной области растекания. В результате вычислены скорости потока в отводящем русле и длина переходной области. На основе вычисления оптимального значения второй сопряженной глубины установлена длина водобоя без гасителя. В условиях беспрыжкового сопряжения за водобойной стенкой определена ее высота, а также вычислена длина водобоя.

**Ключевые слова:** гидроузел, сопряжение бьефов, водослив практического профиля, MathCAD, водоотводящее русло, свободное растекание, расход, уровень, листовидная область растекания, водобой, гаситель

## INFORMATION-TECHNOLOGICAL MODEL OF HYDROSYSTEM RACES CONJUGATION

Pozdeev A.G., Kuznetsova Y.A.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: PozdeevAG@volgatech.net,  
KuznetsovaYA@volgatech.net

Calculation of the conjugation of the spillway dam races with the round-crested weir in the spatial conditions is performed in MathCAD. Based on the curve of correlation of discharges in the hydrosystem tailrace and the water levels at the nearest gauge, a spline interpolation of level-discharge dependence is built. Parameters of the free flow spreading in the discharge channel behind the spillway dam are calculated. Values of the jet contraction coefficient are established; and the first conjugated depth and the depth in the contracted section are calculated. The limiting natural depth, ensuring the free spreading, and the depth, in which a perfect jump appears in the end of the leaflike area of spreading, are found. As a result, the flow velocity in the discharge channel and the length of the transition area are calculated. Based on the calculation of the optimal value of the second conjugated depth, the length of the apron without dashpot is established. In terms of jumpless conjugation behind the deflector sill, its height is defined, and the apron length is calculated.

**Keywords:** hydrosystem, races conjugation, round-crested weir, MathCAD, discharge channel, free spreading, discharge, level, leaflike area of spreading, apron, dashpot

Целью работы является автоматизация расчетов сопряжения бьефов водосливной плотиной с водосливом практического профиля в пространственных условиях. Предметом исследования является моделирование руслового потока в пространственных условиях в информационной среде MathCAD. Для исследования использованы методы гидравлики открытых водотоков и гидротехнических сооружений на основе информационных технологий. Произведен расчет свободного растекания потока при сопряжении бьефов водосливом практического профиля в среде MathCad на примере Чебоксарской ГЭС. Расчетный максимальный расход ГЭС определяется по кривой связи расходов и уровней воды в нижнем бьефе в зависимости от уровня воды в Камском устье [4, 5].

### Параметры моделирования

При расчете приняты следующие характеристики нижнего бьефа [4, 5]: ширина плотины  $B := 144,5$  м; ширина фронта водосливных отверстий  $b := 20$  м; число водосливных отверстий  $n := 6$ ; высота порога водослива относительно рисбермы  $P := 14$  м; отметка рисбермы БС  $\Delta_p := 40$  м; максимальный уровень нижнего бьефа УНБ  $:= 55,3$  м; отметка концевое крепление  $\Delta_k := 31,5$  м; строительная отметка грунта  $\Delta_r := 28,6$  м; высота падения струи  $z := \Delta_r - \Delta_p$ ,  $z := 2,9$  м; суммарная ширина фронта  $n$  водосливных отверстий  $b := nb_o$ ,  $n := 120$  м; ускорение свободного падения  $g := 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

### Численное моделирование в среде MathCAD

На основании кривой связи установлена зависимость уровня от расхода [4, 5]:

$$\text{Tab УНБ} := (48.2 \quad 52 \quad 54 \quad 55.5 \quad 56.7 \quad 57.6 \quad 58.5 \quad 59.2)^T;$$

$$\text{Tab } Q := 10^3 \cdot (1 \quad 5 \quad 9 \quad 13 \quad 17 \quad 21 \quad 25 \quad 29)^T;$$

Сплайн-интерполяция зависимости уровня  $H$  от расхода  $Q$  имеет вид

$$Q = \text{pspline}(\text{Tab УНБ}, \text{Tab } Q); \quad Q(\text{УНБ}) := \text{interp}(Q, \text{Tab УНБ}, \text{Tab } Q(\text{УНБ})).$$

Расчетный максимальный расход ГЭС  $Q(\text{УНБ}) = 1,243 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$ . Доля расчетного расхода плотины от расхода ГЭС  $\varepsilon = 0,5$ . Расход через плотину  $Q_n := \varepsilon \cdot Q(\text{УНБ})$ ,  $Q_n = 6,213 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Расход через отверстие при НПУ  $q := \frac{Q_n}{B}$ ,  $q = 43 \text{ м}^3/\text{с}$ . Относительная ширина потока на плотине  $\beta := \frac{b}{B}$ ,  $\beta = 0,83$ . Отметка НПУ := 63 м. Напор на пороге водослива  $H_0 := \text{НПУ} - P_{\text{п}} - \Delta_p$ ,  $H_0 = 9 \text{ м}$ . Энергия перед сооружением относительно дна водобоя  $T_0 := P_{\text{п}} + H_0$ ,  $T_0 = 23 \text{ м}$ . Коэффициент скорости  $\varphi := 0,95$ .

Начальное значение критической глуби-

ны  $h_k := \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ ,  $h_k = 5,733 \text{ м}$ . Коэффициент

энергии потока  $\xi_0 := \frac{T_0}{h_k}$ ,  $\xi_0 = 4,012$ . Связь

коэффициента сжатия  $\xi'_c$  с коэффициентом

$\xi_0 = \frac{T_0}{h_k}$  имеет вид  $\xi'_c = f(\xi_0)$ .

Вектор-столбец значений коэффициента

кинетической энергии  $\xi_0 = \frac{T_0}{h_k}$  имеет вид

$$\text{Tab } \xi_0 := (2.0 \quad 3.0 \quad 4.0 \quad 5.0 \quad 6.0 \quad 7.0 \quad 8.0 \quad 9.0 \quad 15.0)^T.$$

Вектор-столбцы значений коэффициента сжатия  $\xi'_c$  имеют вид:

– при коэффициенте скорости  $\varphi = 0,80$

$$\text{Tab } \xi'_{c1} := (0.82 \quad 0.62 \quad 0.485 \quad 0.41 \quad 0.37 \quad 0.34 \quad 0.32 \quad 0.30 \quad 0.23)^T;$$

– при коэффициенте скорости  $\varphi = 0,85$

$$\text{Tab } \xi'_{c2} := (0.75 \quad 0.55 \quad 0.43 \quad 0.39 \quad 0.35 \quad 0.32 \quad 0.30 \quad 0.28 \quad 0.215)^T;$$

– при коэффициенте скорости  $\varphi = 0,90$

$$\text{Tab } \xi'_{c3} := (0.67 \quad 0.52 \quad 0.42 \quad 0.37 \quad 0.33 \quad 0.315 \quad 0.29 \quad 0.27 \quad 0.21)^T;$$

– при коэффициенте скорости  $\varphi = 0,95$

$$\text{Tab } \xi'_{c4} := (0.65 \quad 0.5 \quad 0.39 \quad 0.345 \quad 0.31 \quad 0.29 \quad 0.27 \quad 0.25 \quad 0.195)^T;$$

– при коэффициенте скорости  $\varphi = 1,00$

$$\text{Tab } \xi'_{c5} := (0.60 \quad 0.46 \quad 0.37 \quad 0.33 \quad 0.30 \quad 0.27 \quad 0.255 \quad 0.24 \quad 0.19)^T.$$

Коэффициент сжатия  $\xi'_c$  от коэффициента  $\xi_0 = \frac{T_0}{h_k}$  имеет вид

$$\xi'_{c1} := \text{linterp}(\text{Tab } \xi_0, \text{Tab } \xi'_{c1}, \xi_0);$$

$$\xi'_{c2} := \text{linterp}(\text{Tab } \xi_0, \text{Tab } \xi'_{c2}, \xi_0);$$

$$\xi'_{c3} := \text{linterp}(\text{Tab } \xi_0, \text{Tab } \xi'_{c3}, \xi_0);$$

$$\xi'_{c4} := \text{linterp}(\text{Tab } \xi_0, \text{Tab } \xi'_{c4}, \xi_0);$$

$$\xi'_{c5} := \text{linterp}(\text{Tab } \xi_0, \text{Tab } \xi'_{c5}, \xi_0).$$

Табличные значения связи коэффициента сжатия  $\xi'_c$  с коэффициентом скорости  $\varphi$  [3] имеют вид матричных строк:

$$\text{Tab}\varphi := (0.80 \ 0.85 \ 0.90 \ 0.95 \ 1.00)^T;$$

$$\text{Tab}\xi'_c := (\xi'_{c1} \ \xi'_{c2} \ \xi'_{c3} \ \xi'_{c4} \ \xi'_{c5})^T.$$

В результате строится сплайн-интерполяция функции коэффициента сжатия  $\xi'_c$  от коэффициента скорости

$$v\xi'_c := \text{pspline}(\text{Tab}\varphi, \text{Tab}\xi'_c);$$

$$\xi'(\varphi) := \text{interp}(v\xi'_c, \text{Tab}\varphi, \text{Tab}\xi'_c, \varphi).$$

Значение коэффициента сжатия  $\xi'_c$  при заданной величине коэффициента скорости  $\varphi$  равно  $\xi'_c(\varphi) = 0,389$ . Связь  $\xi'_c$  с  $\varphi$  выражается постоянной величиной.

Первая сопряженная глубина  $h_1 := \xi'_c \cdot h_k$ ,  $h_1 = 2,233$  м. Глубина в сжатом сечении  $h'_c := h_1$ ,  $h_c = 2,223$  м. Коэффициент кинетичности потока  $\alpha := 1$ . Число Фруда  $\text{Fr} := \frac{\alpha q^2}{gh_c^3}$ ,

$\text{Fr} = 16,926$ . Коэффициент формы струи равен  $N := \frac{b}{h_c}$ ,  $N = 53,739$ .

Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения удельного расхода по сечению  $k := 0,8 - (0,8 - \beta)$ ,  $k = 0,73$  [2]. Предельная бытовая глубина, обеспечивающая свободное растекание,

$$h_n := 0,5\beta k h_1 \left( \sqrt{1 + \frac{8Q_n^2 B}{gb^3 h_1^3}} - 1 \right), \quad h_n = 9,759 \text{ м.}$$

Критическая глубина

$$h_k := \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_n^2}{gB^2}}, \quad h_k = 5,733 \text{ м.}$$

Минимальная бытовая глубина, при которой образуется одна область растекания,  $h_{6,\text{min}} := 1,3h_k$ ,  $h_{6,\text{min}} = 7,453$  м. Глубина, при которой появляется совершенный прыжок в конце листовидной области растекания,  $h_2 := 1,5h_k$ ,  $h_2 = 8,6$  м. Тангенс угла растекания

$$\text{tg}\varphi := \frac{1,3}{\sqrt{\text{Fr}}}, \quad \text{tg}\varphi = 0,316.$$

$$\text{Tab}\beta := 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1.0;$$

$$\text{Tab}\alpha := 1.57 \ 1.57 \ 1.583 \ 1.667 \ 1.8 \ 2.0 \ 2.28 \ 2.58 \ 2.93 \ 3.35.$$

Угол растекания равен

$$\varphi := \frac{180}{\pi} \text{atan}(\text{tg}\varphi) [1], \quad \varphi = 17,536 \text{ град.}$$

Расстояние от выходного сечения до сечения полного растекания

$$l_s := \frac{B-b}{2\text{tg}\varphi}, \quad l_s = 38,768 \text{ м.}$$

Общая длина листовидной области растекания

$$l_n := 0,38\sqrt{\text{Fr}}(2,1B-b) [3], \quad l_n = 286,8 \text{ м.}$$

Глубина в конце листовидной области

$$h_n := 0,5h_2 \left( \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gh_n^3}} - 1 \right), \quad h_n = 3,594 \text{ м.}$$

Скорость в конце листовидной области растекания

$$v_n := \frac{Q_n}{h_n B}, \quad v_n = 11,963 \text{ м/с.}$$

Скорость равномерного движения в отводящем русле

$$v := \frac{Q_n}{h_{6,\text{min}} B}, \quad v = 5,769 \text{ м/с.}$$

Длина переходной зоны Б

$$l_6 := 65(h_k - h_n) [2], \quad l_6 = 139,045 \text{ м.}$$

При этом скорости уменьшаются от  $v_n = 11,963$  м/с до  $v = 5,769$  м/с. Площадь живого сечения в створе с критической глубиной

$$\omega_k := Nh_k^2, \quad \omega_k = 1,766 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения в створе первой сопряженной глубины

$$\omega_1 := bh_1, \quad \omega_1 = 267,96 \text{ м}^2.$$

Длина перехода в спокойное состояние

$$l_n := 16,7(h_k - h_1) [1], \quad l_n = 58,456 \text{ м.}$$

Табличные значения связи угла расширения струи  $\alpha$  с относительной шириной фронта водосливных отверстий  $\beta = \frac{b}{B}$ :

Далее производится сплайн-интерполяция зависимости угла расширения струи  $\alpha$  с относительной шириной фронта

водосливных отверстий  $\beta = \frac{b}{B}$ .

Вектор кубического сплайна имеет вид

$$v\alpha = \text{pspline}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\alpha);$$

$$\alpha(\beta) := \text{interp}(v\alpha, \text{Tab}\beta, \text{Tab}\alpha, \beta).$$

Угол расширения транзитной струи  $\alpha(\beta) = 2,68$  град. Тангенс угла расширения транзитной струи

$$\text{tg}\alpha := \tan\left(\frac{\pi}{180}\alpha(\beta)\right), \quad \text{tg}\alpha = 0,047.$$

Коэффициент заполнения русла

$$n_p := \frac{b + 2\text{tg}l_n\alpha}{h_1 + l_n\text{tg}\alpha}, [2], n_p = 25,251.$$

Критическая глубина

$$h_k := \sqrt[5]{\frac{2Q_n^2}{gn_p^2}} [1], h_k = 6,581 \text{ м.}$$

Табличные значения зависимости средней глубины вдоль водосбросного фронта

$\eta_h = \frac{h_p}{h_2}$  с оптимальной глубиной нижнего

бьефа  $\beta = \frac{b}{B}$  при различных числах Фруда:

$$\text{Tab}\beta = (0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 50$

$$\text{Tab}\eta_{h50} := (0.82 \ 0.72 \ 0.66 \ 0.55 \ 0.5 \ 0.42 \ 0.34 \ 0.26 \ 0.18)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 30$

$$\text{Tab}\eta_{h30} := (0.87 \ 0.81 \ 0.74 \ 0.68 \ 0.61 \ 0.543 \ 0.48 \ 0.41 \ 0.34)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 20$

$$\text{Tab}\eta_{h20} := (0.9 \ 0.85 \ 0.8 \ 0.74 \ 0.69 \ 0.64 \ 0.58 \ 0.53 \ 0.48)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 10$

$$\text{Tab}\eta_{h10} := (0.93 \ 0.88 \ 0.834 \ 0.79 \ 0.74 \ 0.69 \ 0.64 \ 0.59 \ 0.55)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 5$

$$\text{Tab}\eta_{h5} := (0.96 \ 0.82 \ 0.88 \ 0.84 \ 0.79 \ 0.755 \ 0.71 \ 0.66 \ 0.62)^T;$$

– число Фруда  $\text{Fr} = 2$

$$\text{Tab}\eta_{h2} := (0.99 \ 0.955 \ 0.92 \ 0.89 \ 0.85 \ 0.82 \ 0.79 \ 0.76 \ 0.73)^T.$$

Линейная интерполяция зависимостей средней глубины по водосбросному фронту  $\eta_h$  от коэффициента оптимальной глубины нижнего бьефа  $\beta$ :

$$\eta_{h2} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h2}, \beta);$$

$$\eta_{h5} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h5}, \beta);$$

$$\eta_{h10} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h10}, \beta);$$

$$\eta_{h20} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h20}, \beta);$$

$$\eta_{h30} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h30}, \beta);$$

$$\eta_{h50} := \text{linterp}(\text{Tab}\beta, \text{Tab}\eta_{h50}, \beta).$$

Табличные значения связи отношения средней глубины вдоль водосбросного фронта  $\eta_h$  с числом Фруда  $\text{Fr}$  имеют вид

$$\text{TabFr} := (2 \ 5 \ 10 \ 20 \ 30 \ 50)^T;$$

$$\text{Tab}\eta_h := (\eta_{h2} \ \eta_{h5} \ \eta_{h10} \ \eta_{h20} \ \eta_{h30} \ \eta_{h50})^T.$$

Вектор кубического сплайна зависимости средней глубины вдоль водосбросного фронта  $\eta_h$  от коэффициента оптимальной глубины нижнего бьефа  $\beta$  имеет вид

$$\eta_h := \text{pspline}(\text{TabFr}, \text{Tab}\eta_h);$$

$$\eta_h(\text{Fr}) := \text{interp}(v\eta_h, \text{TabFr}, \text{Tab}\eta_h, \text{Fr}).$$

Параметр средней глубины вдоль водосбросного фронта  $\eta(\text{Fr}) = 0,538$ . Оптимальная вторая сопряженная глубина [2], при которой возникает спокойное сбойное течение,

$$h_2 := Q_n \sqrt{\frac{2 \left( \frac{11}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_k} \right)}{gB(1 - \eta_h(\text{Fr})^2)}}, \quad h_2 = 8,6 \text{ м.}$$

Расчетная вторая сопряженная глубина  $h_{2s} := 1,1h_2$ ,  $h_2 = 15,574$  м. Длина водобоя без гасителя

$$l_b := \frac{1}{\text{tg}\alpha}(h_k - h_1), \quad l_b = 92,897 \text{ м.}$$

Табличные значения связи коэффициента сжатия  $\xi'_c$  с коэффициентом сжатия  $\xi''_c$ :

$$\text{Tab}\xi'_c := (0.15 \ 0.195 \ 0.27 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.65)^T;$$

$$\text{Tab}\xi''_c := (3.5 \ 3 \ 2.5 \ 2 \ 1.75 \ 1.5)^T.$$

Сплайн-интерполяция зависимости коэффициентов сжатия потока на сопряженных глубинах  $\xi'_c$  и  $\xi''_c$  реализуется в виде вектора кубического сплайна:

$$v\xi''_c := \text{pspline}(\text{Tab}\xi'_c, \text{Tab}\xi''_c);$$

$$\xi''_c(\xi'_c) := \text{interp}(v\xi''_c, \text{Tab}\xi'_c, \text{Tab}\xi''_c, \xi'_c).$$

Вторая сопряженная глубина  $h_{2\xi} := \xi''_c(\xi'_c)h_k$ ,  $h_{2\xi} = 13,369$  м. Вторая сопряженная глубина  $h_{2\xi} = 13,369$  меньше бытовой  $h_2 = 17,131$  или  $h_2 < h_{2\xi}$ , поэтому понижения дна водобоя и рисбермы не требуется.

При коэффициентах сжатия  $\xi'_c = 0,389$  и  $\xi''_c(\xi'_c) = 2,031$  параметр водобоя вычисляется по зависимости

$$\xi_r := \frac{2}{\xi'_c} + \xi'^2_c + 0,33\xi''_c(\xi'_c) - \xi''_c(\xi'_c)^2 - 2,17,$$

$$\xi_r = -0,34.$$

Если точка оказывается справа от кривой «самозатапливающихся» прыжков, при  $\xi_r = 1,2$ , то при коэффициенте сжатия  $\xi_c$  определяется величина

$$\xi''_c(\xi'_c, \xi_r) := 0,167 + \sqrt{\frac{2}{\xi'_c} + \xi'^2_c - \xi_r - 2,17} [3],$$

$$\xi''_c(\xi'_c, \xi_r) = 1,551.$$

Высота сплошной стенки

$$d_c := (\xi''_c(\xi'_c, \xi_r) - 1,15)h_k, \quad d_c = 2,642 \text{ м.}$$

Высота стенки по проекту равна 4,0 м.

Далее приводится проверка выполнения условия беспрыжкового сопряжения за водобойной стенкой. Прежде всего выбираются варианты схем сооружения: истечение из донных отверстий – вариант\_1 := 0; перепады без щитов – вариант\_2 := 0; перепады со щитами – вариант\_3 := 0; водосливы плавной формы без щитов – вариант\_4 := 0; водосливы плавной формы со щитами – вариант\_5 := 1.

$$\varphi_3 := \begin{cases} \varphi_3 \leftarrow 0,97 & \text{if вариант\_1=1;} \\ \varphi_3 \leftarrow 1 & \text{if вариант\_2=1;} \\ \varphi_3 \leftarrow 0,98 & \text{if вариант\_3=1;} \\ \varphi_3 \leftarrow 0,93 & \text{if вариант\_4=1;} \\ \varphi_3 \leftarrow 0,9 & \text{if вариант\_5=1;} \\ \varphi_3 \leftarrow 1 & \text{otherwise;} \end{cases} \quad \varphi_3 = 0,9.$$

Глубина за водобойной стенкой в сжатом сечении

$$h_{2bc} := \sqrt{\frac{2h_k^3}{h_c} + h_c^2 - h_k^2 - \beta h_k} [3], \quad h_{2bc} = 9,264 \text{ м.}$$

Энергия потока за водобойной стенкой относительно дна водобоя

$$T_{0bc} := h_{2bc} + \frac{q^2}{2gh_k^2} [3], \quad T_{0bc} = 11,44 \text{ м.}$$

При глубине  $h_6$ , равной глубине за водобойной стенкой  $h_6 := h_{2bc}$ ,  $h_6 = 9,264$  м, параметры  $M_{bc}$  и  $N_{bc}$  уравнения для глубины в сжатом сечении равны

$$M_{bc} := \frac{\varphi_3 h_k^3 \sqrt{2gT_{0bc}}}{qT_{0bc}^2}, \quad M_{bc} = 0,683;$$

$$N_{bc} := \frac{h_6^2 - 0,33h_6 h_k + 2,17h_k^2}{T_{0bc}^2} [3], \quad N_{bc} = 1,22.$$

Уравнение для относительной глубины в сжатом сечении  $\tau_0 = \frac{h_0}{T_{0bc}}$  решается с помощью функции root при стартовом значении  $\tau_0 := 0,9$

$$F(\tau_0) := \tau_0^2 + 2M_{bc} \sqrt{1 - \tau_0} - N_{bc} [3],$$

$$\tau_0 := 0,9 \quad \tau_0 := \text{root}(F(\tau_0), \tau_0), \quad \tau_0 = 0,938.$$

Отсюда глубина в сжатом сечении  $h_0 := \tau_0 T_{0bc}$ ,  $h_0 = 10,728$  м. Скорость потока

за водобойной стенкой  $v_1 := \varphi_3 \sqrt{2g(T_{\text{овс}} - h_0)}$  [3],  $v_1 = 3,364$  м/с. Глубина в сжатом сечении  $h_{1\text{вс}} := \frac{q}{v_1}$ ,  $h_{1\text{вс}} = 12,78$  м. Глубина в сжа-

том сечении за водобойной стенкой больше критической глубины, и сопряжение бьефов будет беспрыжковым. В этом случае за водобойной стенкой следует проектировать только рисберму.

Коэффициент расхода водослива  $m := 0,48$ . Длина водобоя

$$l_{\text{в}} := 5,0\beta T_{\text{овс}} \sqrt{\frac{mh_0}{P_n}} [3], \quad l_{\text{в}} = 26,77 \text{ м.}$$

Проектная длина водобоя равна 64 м.

### Интерпретация результатов

Разработанная информационно-технологическая модель, реализованная в среде MathCAD, позволяет уточнить параметры сопряжения бьефов гидроузла за счет учета планового характера растекания потока в водоотводящем русле и автоматизировать процесс гидравлических расчетов. Применение информационных технологий создает условия для замены вычислений с помощью громоздких таблиц на расчеты гидравлических параметров потока с помощью сплайнов.

### Выводы

Расчет сопряжения бьефов в пространственных условиях, выполненный на примере водосливной плотины Чебоксарской ГЭС, в информационной среде позволил установить численные значения максимального расхода ГЭС при снятии номинальной мощности. Найдены расходы водосливной плотины при различных значениях коэффициента скорости потока. Найдены скорости равномерного движения в отводящем русле, длина переходной области, угол расширения транзитной струи, значения первой и второй сопряженной глубин. Получены значения конструктивных параметров средств гашения энергии потока в нижнем

бьефе. Сравнение результатов автоматизированных вычислений с данными проекта Чебоксарской ГЭС показало высокую адекватность предложенной методики.

### Список литературы

1. Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов; под общ. ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
2. Гунько Ф.Г. Материалы по гидравлическим расчетам нижних бьефов водосливных бетонных и железобетонных плотин, возводимых на скальных основаниях. – М.: Энергия, 1966. – 110 с.
3. Кузнецов С.К. Теория и гидравлические расчеты нижнего бьефа. – Львов: Вища школа, 1983. – 176 с.
4. Кузнецова Ю.А. Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.
5. Поздеева Ю.А. Разработка средств инженерно-экологической защиты сооружений нижнего бьефа Чебоксарского гидроузла. – Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т., 2005. – 58 с. Деп. В ВИНТИ 14.09.05, № 1223-B2005.

### References

1. Gidrotehnicheskie sooruzhenija: spravochnik proektirovshhika / G.V. Zheleznyakov, Ju.A. Ibad-zade, P.L. Ivanov; pod obshh. red. V.P. Nedrigi. M.: Strojizdat, 1983. 543 p.
2. Gunko F.G. Materialy po gidravlicheskim raschetam niznih befov vodoslivnyh betonnyh i zhelezobetonnyh plotin, vozvodimyh na skalnyh osnovanijah. M.: Jenergija, 1966. 110 p.
3. Kuznecov S.K. Teorija i gidravlicheskie raschety niznego befa. Lvov: Vishha shkola, 1983. 176 p.
4. Kuznecova Ju.A. Sredstva inzhenerno-jekologicheskoj zashhity niznih befov gidrouzlov: monografija. Joshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet, 2014. 260 p.
5. Pozdeeva Ju.A. Razrabotka sredstv inzhenerno-jekologicheskoj zashhity sooruzhenij nizhnego befa Cheboksarskogo gidrouzla. Joshkar-Ola: Marijsk. gos. tehn. un-t., 2005. 58 p. Dep. V VINITI 14.09.05, no. 1223-V2005.

### Рецензенты:

Мануковский А.Ю., д.т.н., профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», г. Воронеж;  
Алибеков С.Я., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения и технической диагностики, ФГБОУ ВПО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола.