

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 627.81

doi: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-302-315

### Реконструкция Новотроицкого водохранилища в Ставропольском крае

**Александр Александрович Ткачев<sup>1</sup>, Александр Михайлович Анохин<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

<sup>1</sup>prof\_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

<sup>2</sup>anocxin2014@yandex.ru

**Аннотация. Цель:** проверка подводящего канала к перепаду № 1 на пропускную способность в связи с изменением расхода канала. В связи с увеличением расчетных расходов на орошение и обводнение проектируется строительство канала из водохранилища к перепаду № 1. В задачи гидравлического расчета входило установление параметров подводящего канала для заданного катастрофического расхода 375 куб. м/с, расчет выполнялся с учетом неравномерного движения воды в канале. Для эффективного гашения энергии в нижнем бьефе перепада требуется принять конструктивное решение и выполнить обоснование с учетом топографических условий работы сооружения. Необходимо решить вопрос о погашении энергии в нижнем бьефе сооружения. Представлены расчеты зубчатого порога для гашения энергии в нижнем бьефе. **Материалы и методы.** К расчету принят вариант гасителя с зубчатой стенкой, которая позволяет эффективно гасить энергию в стесненных условиях и получить благоприятное распределение скоростей в потоке в нижнем бьефе сооружения. Выполнен поэтапный расчет для определения пропускной способности перепада № 1: сначала определили пропускную способность подводящего канала при катастрофическом расходе  $Q = 375$  куб. м/с с последующим изменением его гидравлических параметров, затем приведены расчеты по гашению энергии потока в нижнем бьефе сооружения. **Результаты:** представлены расчеты зубчатого порога для гашения энергии в нижнем бьефе, запроектирована зубчатая стенка падения и рассчитаны соответствующие глубины в нижнем бьефе. **Выводы:** выполненные расчеты подводящего канала и перепада № 1 позволили обеспечить пропуск катастрофического расхода, равного 375 куб. м/с, в заданных условиях.

**Ключевые слова:** водохранилище, канал, перепад, расход, нижний бьеф, сопряженная глубина, пропускная способность, водобой, зубчатая стенка

## HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

### Reconstruction of the Novotroitsk reservoir in Stavropol Territory

**Alexander A. Tkachev<sup>1</sup>, Alexander M. Anokhin<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

<sup>1</sup>prof\_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

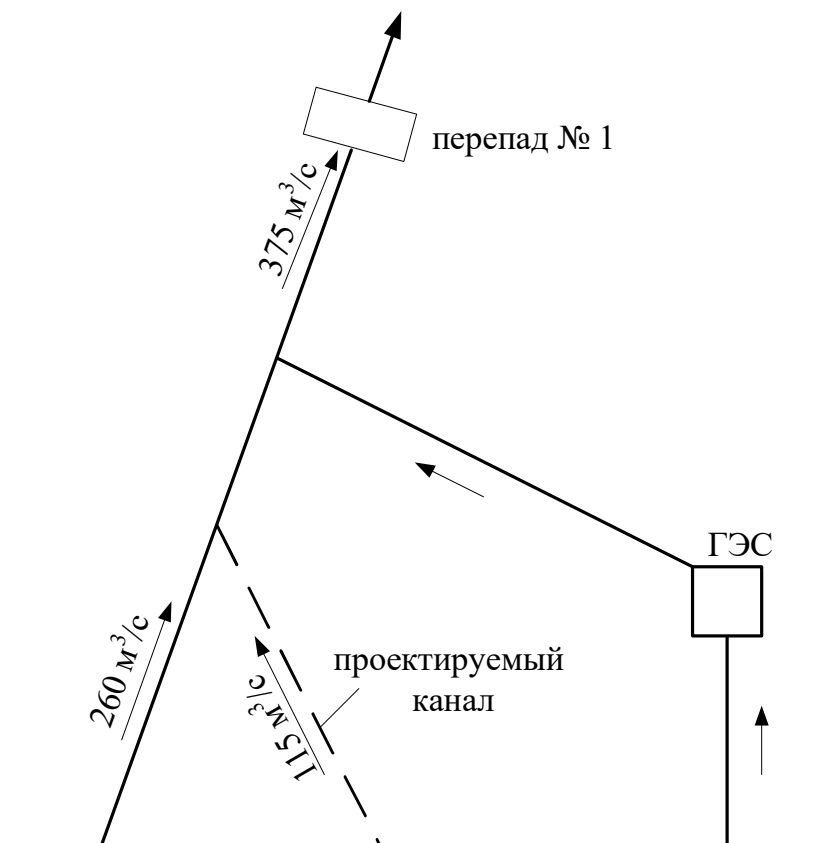
<sup>2</sup>anocxin2014@yandex.ru

**Abstract. Purpose:** checking the headrace canal to the fall no. 1 for diversion capacity in connection with a change in the canal discharge. Due to the increase in the estimated flow for irrigation and watering, it is planned to build a canal from the reservoir to the fall no. 1. The tasks of the hydraulic computation included the determining of the headrace canal parameters for the intended catastrophic water discharge of 375 cubic m/s, the computation was carried out taking into account the non-steady flow in canal. For effective energy extinction in the tail-race of the fall, it is required to make a constructive decision and carry out a justification taking into account the topographic conditions of the structure's operation. It is necessary to resolve the issue of energy extinction in tail-race of the structure. Calculations of the toothed overfall for energy extinction in the tail-race are presented. **Materials and methods.** A version of the dissipator with an indented wall which allows dissipate energy in the constraint environment effectively and obtain a favorable distribution of velocities in the flow in tail race of the structure was adopted for the computation. A step-by-step computation for determining the diversion capacity of the fall no. 1 was carried out: first, the diversion capacity of the headrace canal was determined at a catastrophic discharge  $Q = 375$  cubic m/s with a subsequent change in its hydraulic parameters, then the computation for dissipating the flow energy in the downstream of the structure are given. **Results:** the calculations of the jagged sill for damping the energy in the tail-race are presented, the indented wall of the fall is designed and the corresponding depths in the tail-race are calculated. **Conclusions:** the performed computation of the headrace canal and fall no. 1 made it possible to ensure the passage of a catastrophic flow rate equal to 375 cubic m/s, under set conditions.

**Keywords:** reservoir, canal, fall, discharge, tail-race, compound depth, diversion capacity, apron, indented wall

**Введение.** Новотроицкое водохранилище входит в систему Кубань-Егорлыкского водного тракта (Кубань-Егорлыкская ООС), осуществляющего самотечную переброску стока р. Кубани на северо-восточные склоны Ставропольской возвышенности в засушливые бассейны маловодных рек Большой Егорлык и Западный Маныч.

Новотроицкое водохранилище образовано земляной плотиной, перегораживающей русло р. Б. Егорлык, на 110-м километре Кубань-Егорлыкского водного тракта. Водоохранилище комплексного назначения. Назначение водохранилища по проекту – поднятие горизонта воды в р. Б. Егорлык с целью обеспечения самотечного водозабора в Правое Егорлыкский канал для нужд орошения и обводнения, сброс паводковых и обводнительных расходов в р. Егорлык, обеспечение подачи воды к Новотроицкой ГЭС. После строительства Ставропольской ГРЭС водохранилище является источником ее технологического водоснабжения (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Схема подводящих каналов к перепаду № 1**

**Материалы и методы.** Для увеличения расходов на орошение и обводнение проектируется строительство канала из водохранилища к перепаду № 1. Таким образом общий расход магистрального канала увеличивается до  $375 \text{ м}^3/\text{с}$ . Поэтому необходимо выполнить проверку подводящего канала к перепаду № 1 на пропускную способность.

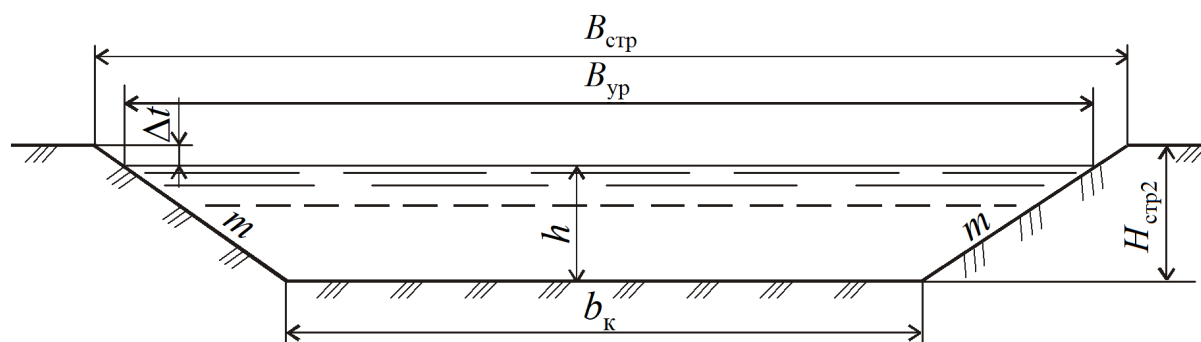
Так как проектируемый перепад № 1 Новотроицкого водохранилища представляет собой водослив практического профиля с вертикальной стенкой падения, то необходимо определить для заданного максимального катастрофического расхода  $Q = 375 \text{ м}^3/\text{с}$  гидравлические параметры подводящего канала.

Подводящий канал представляет собой русло трапецеидального сечения шириной по дну  $b = 40 \text{ м}$ , откосы  $m = 2,0$ . Дно и откосы канала крепятся камнем  $d_{\text{ср}85\%} = 200 \text{ мм}$ . Дно канала проходит в отметках 128,00–129,00,

уклон принимается  $i = 0,000$ . Расчетная скорость движения принимается  $V_p = 2,80...4,90$  м/с. Коэффициент шероховатости для каменной наброски принимаем  $n = 0,030$  (5,8).

Исходными данными для расчета подводящего канала являются сведения о расходе перепада ( $Q_{сбр}$ ), расчетной скорости, заложении откосов по трассе канала и глубинах в начальном ( $h_1$ ) и конечном ( $h_2$ ) его сечениях [1–3].

Задача расчета заключается в определении всех гидравлических элементов его живого сечения (рисунок 2).



$B_{стр}$  – строительная ширина подводящего канала, м;  $B_{ур}$  – ширина подводящего канала по урезу воды, м;  $h$  – глубина воды в подводящем канале, м;  $b_к$  – ширина подводящего канала по дну, м;  $H_{стр2}$  – глубина подводящего канала, м;  $m$  – коэффициент заложения откосов;  $\Delta t$  – возвышение берм и бровок канала над уровнем, м

**Рисунок 2 – Схема поперечного сечения канала**

Для обеспечения сброса излишних паводковых вод из водохранилища при минимальной форсировке уровней подводящий к сбросному сооружению канал должен иметь широкий фронт забора, т. е. значительную ширину по дну при сравнительно небольшой глубине (сечение 1–1).

В конце подводящего канала, у сопрягающего сооружения (сечение 2–2) целесообразно иметь более глубокий и узкий канал для удобства сопряжения его с небольшим по ширине сопрягающим сооружением.

При изменении глубины и ширины канала по дну движение потока в нем будет неравномерным.

Для расчета таких каналов рекомендуется воспользоваться методом В. И. Чарномского и вести его в нижеприведенной последовательности.

1 Устанавливаем гидравлические элементы канала в граничных сечениях:

$$- 1-1: \omega_1, h_1, \chi_1, C_1, H_{\text{стр}1}, B_{\text{стр}1};$$

$$- 2-2: \omega_2, h_2, \chi_2, C_2, H_{\text{стр}2}, B_{\text{стр}2},$$

используя при расчете известные зависимости:

$$\omega = Q/V_p,$$

$$b = Q/h - m \cdot h,$$

$$\chi = b + 2 \cdot h\sqrt{1 + m^2},$$

$$R = \omega / \chi,$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y,$$

$$H_{\text{стр}} = h + \Delta t,$$

$$B_{\text{стр}} = b + 2 \cdot m \cdot H_{\text{стр}},$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;

$Q$  – расчетный расход сооружения, м<sup>3</sup>/с;

$V_p$  – расчетная скорость течения воды в канале, м/с;

$b$  – ширина канала по дну, м;

$h$  – глубина воды в канале, м;

$m$  – коэффициент заложения откосов;

$\chi$  – смоченный периметр;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$C$  – коэффициент Шези, м<sup>0,5</sup>/с;

$n$  – коэффициент шероховатости канала,  $n = 0,03$ ;

$y$  – показатель степени, зависящий от величины коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса;

$\Delta t$  – возвышение берм и бровок канала над уровнем, 1 м.

2 Определяем средние между сечениями 1 и 2 значения:

$$R_{\text{cp}} = \frac{(R_1 + R_2)}{2},$$

где  $R_{\text{cp}}$  – средний гидравлический радиус, м;

$R_1$  – гидравлический радиус в 1-м сечении, м;

$R_2$  – гидравлический радиус во 2-м сечении, м,

$$C_{\text{cp}} = \frac{(C_1 + C_2)}{2},$$

где  $C_{\text{cp}}$  – средний коэффициент Шези,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;

$C_1$  – коэффициент Шези в 1-м сечении,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;

$C_2$  – коэффициент Шези во 2-м сечении,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ,

и средний уклон трения ( $J_{f_{\text{cp}}}$ ):  $J_{f_{\text{cp}}} = \frac{V_p^2}{(C_{\text{cp}}^2 \cdot R_{\text{cp}})}$ .

3 Устанавливаем уклон дна канала ( $J_0$ ):

$$J_0 = \frac{(h_2 - h_1)}{L_k} + J_{f_{\text{cp}}},$$

где  $h_2$  – глубина во 2-м сечении, м;

$h_1$  – глубина в 1-м сечении, м;

$L_k$  – длина подводящего канала, м.

Расчетные зависимости используем для автоматизированного расчета средствами MS Excel. Результаты расчета для расхода  $Q_{0,001\%} = 375 \text{ м}^3/\text{с}$  и расчеты средних значений по длине подводящего канала приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Расчетные гидравлические параметры подводящего канала в крайних сечениях 1–1 и 2–2 для  $Q_{0,001\%} = 375 \text{ м}^3/\text{с}$**

| Сечение | $V_p, \text{ м/с}$ | $\omega, \text{ м}^2$ | $b, \text{ м}$ | $h, \text{ м}$ | $\chi$ | $R, \text{ м}$ | $C$    | $H_{\text{стр}}, \text{ м}$ | $B_{\text{стр}}, \text{ м}$ |
|---------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------|--------|----------------|--------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1–1     | 4                  | 93,75                 | 30             | 4,44           | 49,848 | 1,881          | 41,111 | 5,44                        | 47,75                       |
| 2–2     | 3                  | 125,00                | 40             | 3,88           | 57,335 | 2,180          | 41,139 | 4,88                        | 55,51                       |

Продолжение таблицы 1

| Сечение | $R_{cp}$ , м | $C_{cp}$ , м <sup>0,5</sup> /с | $J_{fcp}$ | $J_0$  |
|---------|--------------|--------------------------------|-----------|--------|
| 1–1     | 2,03044      | 41,1249                        | 0,00262   | 0,0015 |
| 2–2     |              |                                |           |        |

По результатам расчетов видно, что при расчетной скорости за водосбросным сооружением Новотроицкого водохранилища, равной 2,5 м/с, и ширине канала по дну  $b = 40,00$  м глубина в канале в первом сечении составит 5,00 м. При расчетной скорости на подходе к перепаду № 1, равной 3,0 м/с, и ширине канала по дну  $b = 40,00$  м глубина в канале во втором сечении составит 3,88 м. Средний уклон трения по участку составит 0,0033.

Одним из важнейших этапов гидравлического расчета сооружений является решение вопроса о погашении в нижнем бьефе сооружения избытка той энергии, которую несет в себе поток, прошедший сооружение [4–6].

Стремление к уменьшению ширины водосливного фронта по экономическим соображениям, а иногда невозможность создания достаточно широкого водосливного фронта по топографическим условиям часто приводит к значительным удельным расходам сооружения. В современной гидротехнической практике нередки случаи, когда удельный расход сооружения составляет 50–100 м<sup>3</sup>/с на 1 пог. м ширины водосливного фронта. При таких удельных расходах вопрос о погашении энергии в нижнем бьефе сооружения приобретает исключительное значение и представляет нетривиальную задачу для выбора корректных проектных решений. При проектировании гидротехнических сооружений желательно создать такие условия, при которых оказывается возможным погасить избыток энергии в непосредственной близости от сооружения, т. е. стремятся создать причины к появлению местных потерь энергии.

Назначением таких устройств является рассеивание энергии в непосредственной близости от сооружения или, лучше, в пределах самого сооружения. Эти устройства получили в гидротехнике наименование гасителей энергии.

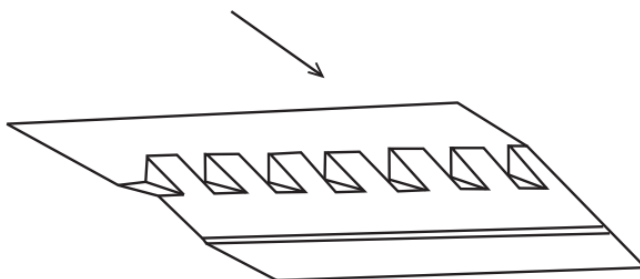
Важно отметить, что гасители энергии нередко играют и другую весьма существенную роль, а именно с помощью этих устройств часто удается получить в нижнем бьефе сооружения поверхностный режим. Хотя поверхностный режим также требует крепления русла в нижнем бьефе сооружения, но это крепление будет более легким, чем в условиях донного режима. Экспериментальные исследования показывают, что значительный эффект в отношении погашения энергии достигается в тех случаях, когда тот или иной гаситель энергии вызывает в потоке образование водоворотов (или, как их часто называют, вальцов). Эти водовороты являются областью циркуляционного движения воды и, по данным экспериментальной гидравлики, способны поглотить значительное количество энергии, преобразуя ее в тепловую. Водовороты могут образоваться как донные, так и поверхностные, причем поверхностные водовороты, вообще говоря, поглощают большее количество энергии, чем донные. Большим успехом в гидротехнической практике пользуются зубчатые пороги, которые являются, пожалуй, не только гасителями энергии, но и таким устройством, которое позволяет получить благоприятное распределение скоростей в потоке в нижнем бьефе сооружения. Прием для гашения энергии в нижнем бьефе зубчатый порог [7, 8].

Зубчатый порог, как это видно на рисунке 3, представляет собой порог треугольного профиля и целый ряд зубьев, имеющих вертикальную переднюю грань и расположенных на этом пороге, причем верхняя грань зубьев наклонена к горизонту и служит продолжением задней грани треугольного порога.

**Результаты и обсуждение.** Изучение экспериментальных материалов, характеризующих работу зубчатого порога, дает основание утверждать, что правильно устроенный зубчатый порог, во-первых, в значительной степени уменьшает глубину размыва, во-вторых, отодвигает зону размыва от сооружения, и в-третьих, позволяет значительно сократить

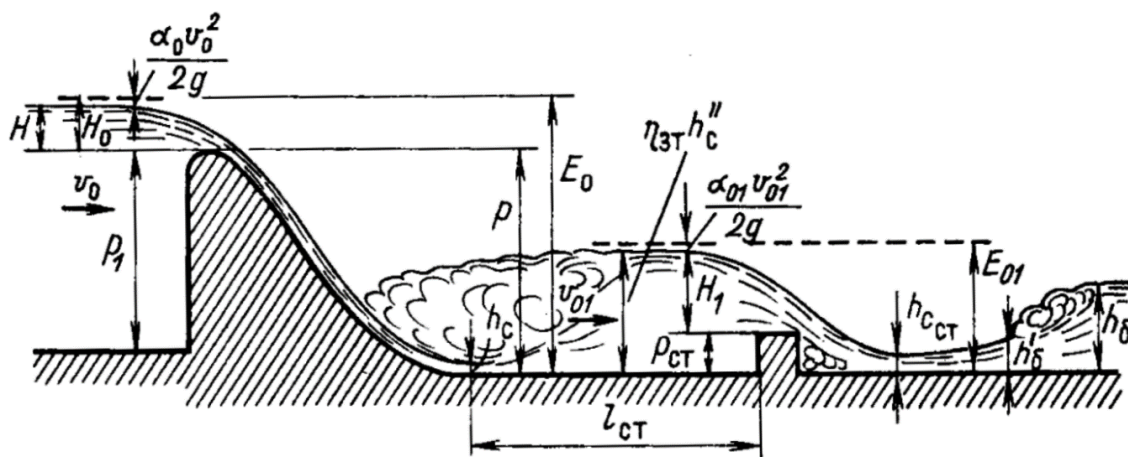


длину водобойной части, это делает его выбор значительно более экономически обоснованным. Проверку водобойной части проектируемого перепада № 1 на пропускную способность выполняем из условия гашения гидравлического прыжка в нижнем бьефе [9–13].



**Рисунок 3 – Пример зубчатого гасителя энергии**

Расчет производится в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4, в следующей последовательности.



$P_1, P$  – высота порога водослива со стороны верхнего и нижнего бьефа, м;  
 $H, H_0$  – напор и полный напор с учетом скорости подхода над порогом водослива, м;  
 $\frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}, \frac{\alpha_{01} V_{01}^2}{2g}$  – скоростной напор перед водосливом и за гидравлическим прыжком, м/с;  
 $V_0, V_{01}$  – скорость течения перед водосливом и перед водобойной стенкой, м/с;  
 $h_c$  – глубина в сжатом сечении за сооружением перед водобойной стенкой, м;  
 $E_0, E_{01}$  – полная энергия потока перед сооружением и перед водобойной стенкой, м;  
 $\eta_{3T} h''$  – глубина с учетом заполнения гидравлического прыжка, м;  $H_1$  – напор над водобойной стенкой;  $P_{СТ}$  – высота водобойной стенки, м;  $l_{СТ}$  – длина гасителя, расстояние до водобойной стенки, м;  $h_{СТ}$  – сжатая глубина за водобойной стенкой, м;  
 $h'_б, h_б$  – бытовая глубина с учетом гидравлического прыжка и в отводящем русле, м

**Рисунок 4 – Расчетная схема гасителя с водобойной стенкой**

Определяется удельный расход ( $q$ ), м<sup>3</sup>/с:

$$q = \frac{Q}{b_k},$$

где  $b_k$  – ширина канала, м;

$$q = \frac{375}{33} = 11,363 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из уравнения падающей струи определяем первую сопряженную глубину:

$$\frac{q^2}{2 \cdot g \cdot \varphi^2} = h_c'^2 \cdot (P_1 + H_0 - h_c'),$$

$$q = \varphi \cdot h_c' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (P_1 + H_0 - h_c')},$$

где  $\varphi = 0,87$  – коэффициент скорости (таблица 2);

$h_c'$  – сжатая глубина, м;

$P_1$  – высота водосливной части перепада,  $P_1 = 6,3$  м;

$H_0$  – глубина с учетом скоростного напора на пороге водослива, по таблице 3  $H_0 = 3,35$  м.

**Таблица 2 – Определение коэффициента скорости  $\varphi$**

|           |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|
| $P$ , м   | 1,0  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  |
| $\varphi$ | 0,97 | 0,94 | 0,91 | 0,90 | 0,87 |

**Таблица 3 – Расчет глубины на входе в сооружение для расхода  $Q_{0,001\%} = 375 \text{ м}^3/\text{с}$**

| $H_0$ , м | $V_p$ , м/с | $H$ , м | Подбор глубины $h$ , м | $H_{0\text{расч}}$ , м | Минимум $h$ , м |
|-----------|-------------|---------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 3,35      | 4,735       | 2,093   | 2,4                    | 3,657                  | 0,307           |

Подбор первой сопряженной глубины  $h_c'$  выполняем с использованием автоматизированных средств приложения MS Excel ( $h_c' = 1,002$  м).

Вторую сопряженную глубину определяем из уравнения:

$$\frac{6 \cdot Q^2}{g \cdot b_2 \cdot h_c''} + (h_c'')^2 \cdot (b_2 + 2 \cdot b_1) - h_c'' \cdot h_c' \cdot (b_2 - b_1) = \frac{6 \cdot Q^2}{g \cdot b_1 \cdot h_c'} + (h_c')^2 \cdot (b_1 + 2 \cdot b_2),$$

где  $b_1 = b_2 = 33$  м – ширина в 1-м и во 2-м сечениях сооружения.

Обозначим правую часть через  $A_{\text{пр}}$ . Тогда:

$$A_{\text{пр}} = \frac{6 \cdot Q^2}{g \cdot b_1 \cdot h_c'} + (h_c')^2 \cdot (b_1 + 2 \cdot b_2),$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{6 \cdot 375^2}{9,81 \cdot 33 \cdot 1,002} + (1,002)^2 \cdot (33 + 2 \cdot 33) = 2698.$$

Подбор второй сопряженной глубины  $h_c''$  выполняем с использованием автоматизированных средств приложения MS Excel ( $h_c'' = 4,647$  м).

Проверяем условие затопления прыжка с использованием зависимости:

$$\alpha \cdot h_c'' \leq h_6 + P_{\text{ст}},$$

где  $\alpha = 1,10 \dots 1,15$  – коэффициент Кориолиса;

$h_6$  – бытовая глубина за водобойной стенкой, м;

$P_{\text{ст}}$  – высота зубчатой водобойной стенки,  $P_{\text{ст}} = 1,0$  м.

Бытовую глубину принимаем к расчету в створе каменного зуба 3–3. Расчет выполняем в приложении Excel, результаты приведены в таблице 4. С учетом того, что отметка дна отводящего канала составляет 121,70 м, принимаем  $h_6 = 6,11$  м для отметки 122,70 м в створе зубчатой водобойной стенки. В отводящем канале при отметке дна канала 126,10 м, расчетной скорости движения потока для глинистых грунтов 1,2 м/с наблюдается превышение отметок бровки и растекание катастрофического расхода в пойме реки.

**Таблица 4 – Гидравлические параметры отводящего канала в створе отметки дна 121,70 м**

| Сечение | $V_p$ , м/с | $\omega$ , м <sup>2</sup> | $b$ , м | $h$ , м | $\chi$ | $R$ , м | $C$    | $H_{\text{стр}}$ , м | $B_{\text{стр}}$ , м |
|---------|-------------|---------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|----------------------|----------------------|
| 3–3     | 2,2         | 170,455                   | 38,2    | 7,11    | 69,977 | 2,436   | 34,493 | 7,90                 | 69,80                |

Подставляя значения, проверяем условие затопления гидравлического прыжка:  $1,1 \cdot 4,647 \leq 6,11 + 1,0$ .

Условие затопления прыжка соблюдается.

Устанавливаем необходимую длину водобойного колодца ( $L_k$ , м):

$$L_k = l_{\text{отл}} + l_{\text{пр}},$$

где  $l_{\text{отл}}$  – дальность отлета струи, м:

$$l_{\text{отл}} = U_{\text{п}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{ст}} + P_1}{g}},$$

где  $U_{\text{п}}$  – скорость на пороге водослива;

$$l_{\text{отл}} = 4,57 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 + 6,3}{9,81}} = 5,72 \text{ м};$$

$l_{\text{пр}}$  – длина прыжка, м:

$$l_{\text{пр}} = 3,2 \cdot h_c'',$$

$$l_{\text{пр}} = 3,2 \cdot 4,647 = 14,869 \text{ м},$$

$$L_k = 5,72 + 14,87 = 20,59 \text{ м}.$$

Согласно рекомендациям М. Д. Чертоусова, зубчатая стенка падения позволит сократить длину гасителя и повысить надежность работы сооружения, поэтому допускается принимать назначенную конструктивно длину гасителя до зубчатой стенки падения, равную 16,80 м.

**Выводы.** На основе выполненных расчетов изменены параметры подводящего канала из условия пропуска катастрофического расхода 375 м<sup>3</sup>/с. Для гашения энергии в нижнем бьефе перепада № 1 рассчитана зубчатая стенка, которая позволила уменьшить глубину размыва, сократить длину водобойной части до 16,80 м и сэкономить затраты на реконструкцию сооружения.

### Список источников

1. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М., Л.: Госэнергоиздательство, 1957. 678 с.
2. Бакштанин А. М., Жукова Т. Ю. Моделирование гашения энергии и конструкции водобойных колодцев с использованием техники искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 32. С. 1246–1250.
3. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.

4. Абилов Р. С. Модельное исследование нижнего бьефа водосбросных сооружений // Развитие и актуальные вопросы современной науки. 2017. № 2(2). С. 10–15.
5. Специальные задачи гидравлики рек и каналов / Ю. Г. Иваненко, А. М. Бакштанин, А. А. Ткачев, Д. Ю. Иваненко. М., 2020. 220 с.
6. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2008. 656 с.
7. Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учеб. для вузов. 6-е изд., репр. М.: Баскет, 2013. 672 с.
8. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселёв [и др.]; под ред. П. Г. Киселёва. 4-е изд., перераб. и доп. Эколит, 2011. 312 с.
9. Гурьев А. П., Ханов Н. В., Волгин Н. А. Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока // Природообустройство. 2015. № 4. С. 48–51.
10. Судольский Г. А. Разработка и верификация методики гидравлического обоснования конструкции ступенчатых водосбросов // Гидротехническое строительство. 2019. № 7. С. 32–38.
11. Черных О. Н., Бурлаченко А. В. Экспериментальные и имитационные методы исследования режимов сопряжения потока в нижнем бьефе природоохранных водосбросных и сопрягающих сооружений АПК // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2021. № 21. С. 72–80.
12. Hydraulic planning in insular urban territories: The case of Madeira Island – Ribeira Brava / S. Lousada, J. Cabezas, R. A. Castanho, J. M. Naranjo Gómez // Water. 2021. 13(21). 2951. <https://doi.org/10.3390/w13212951>.
13. The urban river restoration index (URRIX) – A supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects / A. P. Veról, B. P. Battemarco, M. L. Merlo, A. C. Marques Machado, A. N. Haddad, M. G. Miguez // Journal of Cleaner Production. Machado, 2019. Vol. 239. 118058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118058>.

## References

1. Chertousov M.D., 1957. *Gidravlika. Spetsial'nyy kurs: uchebnoe posobie* [Hydraulics. Special Course: Textbook]. 3<sup>rd</sup> ed., Moscow, Leningrad, Gosenergoizdatelstvo Publ., 678 p. (In Russian).
2. Bakshtanin A.M., Zhukova T.Yu., 2021. *Modelirovanie gasheniya energii i konstruksii vodoboynykh kolodtsev s ispol'zovaniem tekhniki iskusstvennogo intellekta* [Modeling of energy extinction and the design of the hydraulic jump basin using artificial intelligence technology]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye* [Innovations. Science. Education], no. 32, pp. 1246-1250. (In Russian).
3. Shterenlikht D.V., 1984. *Gidravlika: uchebnyk dlya vuzov* [Hydraulics: Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 640 p. (In Russian).
4. Abilov R.S., 2017. *Model'noe issledovanie nizhnego b'efa vodosbrosnykh sooruzheniy* [Model research of the tail-race spillway structures]. *Razvitie i aktual'nye voprosy sovremennoy nauki* [Development and Topical Issues of Modern Science], no. 2(2), pp. 10-15. (In Russian).
5. Ivanenko Yu.G., Bakshtanin A.M., Tkachev A.A., Ivanenko D.Yu., 2020. *Spetsial'nye zadachi gidravliki rek i kanalov* [Special Tasks of Hydraulics of Rivers and Canals]. Moscow, 220 p. (In Russian).
6. Shterenlikht D.V., 2008. *Gidravlika: uchebnyk dlya vuzov* [Hydraulics: Textbook for Universities]. 3<sup>rd</sup> ed., Moscow, KolosS Publ., 656 p. (In Russian).
7. Chugaev R.R., 2013. *Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti): uchebnyk dlya vuzov* [Hydraulics (Technical Fluid Mechanics): Textbook for Universities]. 6<sup>th</sup> ed., Moscow, Basket Publ., 672 p. (In Russian).

8. Kiselyov P.G. [et al.], 2011. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Computation]. 4<sup>th</sup> ed., Ecolith Publ., 312 p. (In Russian).

9. Guryev A.P., Khanov N.V., Volgin N.A., 2015. *Vliyanie konstruktivnykh parametrov vodoboynogo kolodtsa na gashenie energii potoka* [Influence of the design parameters of the stilling basin on the energy extinction of the flow]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 48-51. (In Russian).

10. Sudolskiy G.A., 2019. *Razrabotka i verifikatsiya metodiki gidravlicheskogo obosnovaniya konstruksii stupenchatykh vodosbrosov* [Development and verification of the method of hydraulic substantiation of the design of step spillways]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 7, pp. 32-38. (In Russian).

11. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., 2021. *Eksperimental'nye i imitatsionnye metody issledovaniya rezhimov sopryazheniya potoka v nizhnem b'efe prirodookhrannykh vodosbrosnykh i sopryagayushchikh sooruzheniy APK* [Experimental and simulation methods for studying flow connection modes in the tail-race of natural water discharge and connecting structures of the agro-industrial complex]. *Vestnik Nauchno-metodicheskogo soveta po prirodoobustroystvu i vodopol'zovaniyu* [Bulletin of Scientific and Methodological Council for Environmental Engineering and Water Use], no. 21, pp. 72-80. (In Russian).

12. Lousada S., Cabezas J., Castanho R.A., Naranjo Gómez J.M., 2021. Hydraulic planning in insular urban territories: The case of Madeira Island – Ribeira Brava. *Water*, 13(21), 2951, <https://doi.org/10.3390/w13212951>.

13. Veról A.P., Battemarco B.P., Merlo M.L., Marques Machado A.C., Haddad A.N., Miguez M.G., 2019. The urban river restoration index (URRIX) – A supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects. *Journal of Cleaner Production*. Machado, vol. 239, 118058, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118058>.

---

#### ***Информация об авторах***

**А. А. Ткачев** – заведующий кафедрой гидротехнического строительства, доктор технических наук, доцент;

**А. М. Анохин** – преподаватель кафедры гидротехнического строительства, кандидат технических наук, профессор.

#### ***Information about the authors***

**A. A. Tkachev** – Head of the Department of Hydraulic Engineering, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

**A. M. Anokhin** – Lecturer at the Department of Hydraulic Engineering, Candidate of Technical Sciences, Professor.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 19.10.2021; одобрена после рецензирования 11.11.2021; принята к публикации 15.11.2021.*

*The article was submitted 19.10.2021; approved after reviewing 11.11.2021; accepted for publication 15.11.2021.*