

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,  
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626/627

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-173-195

**Гидравлическое обоснование параметров водовыпускного  
сооружения в связи с реконструкцией Донского магистрального  
канала (2-я очередь II этапа реконструкции)**

**Сергей Юрьевич Пазынич<sup>1</sup>, Александр Александрович Ткачев<sup>2</sup>,  
Александр Михайлович Рулевский<sup>3</sup>, Екатерина Александровна Волкова<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова –  
филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск,  
Российская Федерация

<sup>1</sup>gts\_i\_sm.nimi@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3970-2638>

<sup>2</sup>Prof\_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

<sup>3</sup>vodolaz.61@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7053-8859>

<sup>4</sup>katerina7tomashevich7@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

**Аннотация.** Цель: расчетное обоснование параметров водовыпускных сооружений Донского магистрального канала для их адаптации к новым гидравлическим условиям, которые (параметры) обеспечили бы надежную и безопасную эксплуатацию, а также снижение рисков затоплений и повреждений. **Материалы и методы.** На основании анализа данных по участку Донского магистрального канала выполнены расчеты подводящей, транзитной части и отводящего канала. Определен согласно материалам и конструктивным особенностям диаметр трубопровода в соответствии с пропускаемым расходом. Отводящий канал рассчитан исходя из требуемой пропускной способности как гидравлически наиболее выгодный с креплением откосов и дна канала из монолитного железобетона. **Результаты.** Для наиболее ответственной части сооружения, в пределах которой происходит сопряжение бурного потока со спокойным с помощью гидравлического прыжка и полное гашение избыточной кинетической энергии потока, установлена форма сопряжения потоков. Выявлено, что имеем устойчивую форму сопряжения бьефов по типу затопленного прыжка (третий тип сопряжения), начало которого располагается в пределах трубы, определены минимальные размеры рисбермы. **Выводы.** Полученные результаты гидравлических расчетов позволяют сделать вывод, что сужение проектного сечения канала под мостом и над ливнепроводами требует облицовки русла, так как вызывает подъем уровня воды выше максимального, при этом закрепление русла камнем невозможно из-за подъема уровня воды выше допустимого. Облицовка канала железобетонными плитами позволяет пропустить проектный расход 110 куб. м/с без превышения максимального уровня и при допустимых скоростях потока. При гидравлическом расчете параметров сооружения учитывалась необходимость обоснования материалов и проектных решений для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации водовыпускных сооружений на Донском магистральном канале.

**Ключевые слова:** водовыпускное сооружение, Донской магистральный канал, гидравлический расчет, гидравлический прыжок, отводящий канал

**Для цитирования:** Гидравлическое обоснование параметров водовыпускного сооружения в связи с реконструкцией Донского магистрального канала (2-я очередь II этапа реконструкции) / С. Ю. Пазынич, А. А. Ткачев, А. М. Рулевский, Е. А. Волкова //

Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 173–195. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-173-195>.

HYDRAULIC ENGINEERING,  
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Hydraulic justification of the water outlet conduit parameters  
in connection with the Don Main Canal reconstruction  
(2nd phase of the II reconstruction stage)**

**Sergey Yu. Pazynich<sup>1</sup>, Alexander A. Tkachev<sup>2</sup>, Aleksandr M. Rulevskiy<sup>3</sup>,  
Ekaterina A. Volkova<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

<sup>1</sup>[gts\\_i\\_sm.nimi@mail.ru](mailto:gts_i_sm.nimi@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-3970-2638>

<sup>2</sup>[Prof\\_al@mail.ru](mailto:Prof_al@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

<sup>3</sup>[vodolaz.61@bk.ru](mailto:vodolaz.61@bk.ru), <https://orcid.org/0009-0000-7053-8859>

<sup>4</sup>[katerina7tomashevich7@mail.ru](mailto:katerina7tomashevich7@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-6471-4490>

**Abstract. Purpose:** calculation substantiation of the Don Main Canal outlet conduit parameters, which would ensure reliable and safe operation, as well as reduced risks of flooding and damage, for their adaptation to new hydraulic conditions. **Materials and methods.** Based on data analysis for the Don Main Canal section, calculations of the headrace, transit part and discharge channel were performed. According to the materials and design features, the pipeline diameter was determined in accordance with the passing flow rate. The discharge channel was calculated based on the required diversion capacity as the most hydraulically advantageous with the monolithic reinforced concrete channel slopes and the bottom fastening. **Results.** For the most critical part of the structure, within which the turbulent flow is coupled with a calm one using a hydraulic jump and complete excess kinetic energy dissipation of the flow, the form of flow conjugation was established. It was found that we have a stable form of pool conjugation according to the type of a submerged jump (the third type of conjugation), the beginning of which is located within the pipe and the apron minimum dimensions are determined. **Conclusions.** The obtained results of hydraulic calculations allow us to conclude that the narrowing of the design cross-section of the channel under the bridge and above the storm drains requires channel lining, since it causes the water level rise above the maximum, while the channel fixing with stone is impossible due to the water level rise above the permissible. Lining the channel with reinforced concrete slabs allows passing the design flow of 110 cub. m/s without exceeding the maximum level and at permissible flow rates. The need to justify the materials and design solutions to ensure the effective and safe operation of the water outlet conduit on the Don Main Canal was taken into account during the hydraulic calculation of the structure parameters.

**Keywords:** water outlet conduit, the Don Main Canal, hydraulic calculation, hydraulic jump, discharge channel

**For citation:** Pazynich S. Yu., Tkachev A. A., Rulevskiy A. M., Volkova E. A. Hydraulic justification of the water outlet conduit parameters in connection with the Don Main Canal reconstruction (2nd phase of the II reconstruction stage). *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(1):173–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-173-195>.

**Введение.** Участок ДМК2-II находится в Мартыновском и Волгодонском районах Ростовской области. Участок ДМК2-II располагается в поймах р. Дон и Сал.

Пойма р. Дон в зоне ДМК2-II достигает ширины 8–11 км. Рельеф поймы изобилует гривами, потяжинами и западинами. Общий уклон поверхности поймы, ориентированный по течению реки, составляет 0,00004 [1–3].

Интенсивность сейсмических воздействий в баллах (сейсмичность) для района строительства принята по СП 14.13330.2018<sup>1</sup> (актуализированная редакция СНиП II-7-81\*) на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2015. Сейсмичность п. Большая Мартыновка по карте А (10 %) составляет 5 баллов, по карте В (5 %) – 5 баллов, по карте С (1 %) – 6 баллов (в баллах MSK-64). Категории грунтов по сейсмическим свойствам – вторая и третья.

**Материалы и методы.** Существующее водовыпускное сооружение сносится в связи с расширением Донского магистрального канала (ДМК), позже здесь будет вписан в русло ДМК с откосами, предусматривается реконструкция водовыпускного сооружения.

В зависимости от грунта задаемся заложением откосов и скоростями потока. Так как водовыпускное сооружение расположено в русле ДМК, где грунтами основания являются суглинки, то принимаем заложение откосов  $m = 2,0$  с расчетной скоростью  $v_{расч} = 1,0$  м/с.

Размеры трубы определяются из условий пропуска заданного расхода  $Q_{зад} = 1,0$  м<sup>3</sup>/с.

Потери напора  $h_w$  в трубе водовыпуска суммируются из потерь при входе  $\zeta_{вх}$ , в башне  $\zeta_{баш}$  и по длине трубы  $\zeta_{тр}$ , при выходе воды в отводящий канал согласно минимальному уровню воды  $\Delta Z_1$ .

---

<sup>1</sup>Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\* [Электронный ресурс]: СП 14.13330.2018: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 24.05.18: введ. в действие с 25.11.18. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

$$Q_{\text{вод}} = \mu \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Z} = 0,65 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,501} = 1,02 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{вод}}$  – расход водовыпуска,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\mu$  – коэффициент расхода;

$\omega_{\text{тр}}$  – площадь живого сечения трубы,  $\text{м}^2$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$Z$  – разница уровней воды, м.

Диаметр трубопровода по требуемому расходу определяем в следующем порядке. Площадь живого сечения трубы,  $\text{м}^2$ :

$$\omega_{\text{тр.треб}} = \frac{Q_{\text{треб}}}{v_{\text{треб}}} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{тр}}$  – требуемый расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$v_{\text{треб}}$  – требуемая расчетная скорость  $\text{м}/\text{с}$ ;

$d_{\text{тр}}$  – диаметр трубы, м.

Скорость воды в трубе,  $\text{м}/\text{с}$ :

$$v_{\text{тр}} = \frac{Q_1}{\omega_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

где  $Q_1$  – расход водного потока в сечении,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Диаметр раструба, м:

$$d_p = (1,2 \dots 1,5) \cdot d_{\text{тр}}. \quad (4)$$

Площадь входа в водопроводящую часть,  $\text{м}^2$ :

$$\omega_{\text{вх}} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4}. \quad (5)$$

Скорость на входе,  $\text{м}/\text{с}$ :

$$v_{\text{вх}} = \frac{Q_1}{\omega_{\text{вх}}}. \quad (6)$$

Потери по водопроводящей части определяем по формуле, м:

$$h_w = \Sigma \xi \cdot \frac{v_{\text{тр}}^2}{2 \cdot g}, \quad (7)$$

где  $\Sigma \xi$  – сумма коэффициентов сопротивления:

$$\Sigma \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{пов}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_{\text{вых}}, \quad (8)$$

где  $\xi_{\text{вх}}$  – коэффициент сопротивления на входе (зависит от плавности входа в трубу):

$$\xi_{\text{вх}} = \xi_{\text{баш}} \cdot \left( \frac{v_{\text{вх}}}{v_{\text{тр}}} \right)^2, \quad (9)$$

где  $v_{\text{тр}}$  – скорость в трубе, м<sup>2</sup>/с;

$\xi_{\text{баш}}$  – коэффициент сопротивления в башне (уклон трубы не должен быть больше 0,25);

$\xi_{\text{пов}}$  – коэффициент сопротивления поверхности трубы;

$\xi_{\text{тр}}$  – коэффициент сопротивления по длине трубы:

$$\xi_{\text{тр}} = \frac{\lambda \cdot l_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления для труб круглого сечения ( $\lambda$  определяется по таблице 1 и назначается в зависимости от диаметра трубы и коэффициента шероховатости  $n = 0,025$ );

$l_{\text{тр}}$  – длина водопроводящей части трубы, м;

$\xi_{\text{вых}}$  – коэффициент сопротивления на выходе:

$$\xi_{\text{вых}} = \left( 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2, \quad (11)$$

где  $\omega_1$  – площадь живого сечения водопроводящей части, м<sup>2</sup>:

$$\omega_1 = \omega_{\text{тр}} \cdot n; \quad (12)$$

$\omega_2$  – площадь выходной части, м<sup>2</sup>:

$$\omega_2 = [(d_{\text{тр}} + 2 \cdot t) \cdot n_{\text{шт}} + (n_{\text{шт}} - 1) \cdot a] \cdot (h_k + d_k), \quad (13)$$

где  $t$  – толщина стенки трубы, мм;

$n_{\text{шт}}$  – количество ниток труб, шт.;

$a$  – расстояние между трубами, м;

$h_k$  – глубина воды в отводящем канале, м;

$d_k$  – диаметр концевой части, м.

**Таблица 1 – Определение коэффициента сопротивления для труб**  
**Table 1 – Determination of the pipe resistance coefficient**

|                            |       |      |       |       |       |
|----------------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| $d_{\text{тр}}, \text{ м}$ | 0,5   | 1    | 1,2   | 1,5   | 2     |
| $\lambda$                  | 0,025 | 0,02 | 0,019 | 0,018 | 0,016 |

Для каждого диаметра  $d_{\text{тр}}$  определяется полная потеря напора. Дальнейшие расчеты ведутся в табличной форме.

В таблице 2 представлен метод подбора диаметра трубы и потерь расхода по требуемой пропускной способности  $Q_{\text{расх}}$  и напору  $H$  [4–6].

**Таблица 2 – Метод подбора диаметра трубы и потерь расхода**  
**Table 2 – Method for selecting pipe diameter and flow losses**

| $d_{\text{тр}}, \text{ м}$ | $\omega_{\text{тр}}, \text{ м}^2$ | $v_{\text{тр}}, \text{ м/с}$ | $d_{\text{р}}, \text{ м}$ | $\omega_{\text{вх}}, \text{ м}^2$ | $v_{\text{вх}}, \text{ м/с}$ | $\xi_{\text{вх}}$ | $Z_{\text{шахт}}, \text{ м}$ | $\xi_{\text{тр}}$ | $\omega_1, \text{ м}^2$ | $\omega_2, \text{ м}^2$ | $\xi_{\text{вых}}$ | $h_w, \text{ м}$ | $Q_{\text{расх}}, \text{ м}^3/\text{с}$ |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------------|
| 0,6                        | 0,28                              | 1,0                          | 0,90                      | 0,64                              | 1,57                         | 0,06              | 0,04                         | 0,08              | 0,28                    | 0,80                    | 0,42               | 0,29             | 0,575                                   |
| 0,8                        | 0,50                              |                              | 1,20                      | 1,13                              | 0,88                         | 0,06              | 0,04                         | 0,58              | 0,50                    | 1,00                    | 0,25               | 0,19             | 1,024                                   |
| 1                          | 0,79                              |                              | 1,50                      | 1,77                              | 0,57                         | 0,06              | 0,04                         | 0,40              | 0,79                    | 1,20                    | 0,12               | 0,05             | 1,600                                   |
| 1,2                        | 1,13                              |                              | 1,80                      | 2,54                              | 0,39                         | 0,06              | 0,04                         | 0,32              | 1,13                    | 1,40                    | 0,04               | 0,02             | 2,304                                   |
| 1,4                        | 1,54                              |                              | 2,10                      | 3,46                              | 0,29                         | 0,06              | 0,04                         | 0,26              | 1,54                    | 1,60                    | 0,00               | 0,01             | 3,136                                   |

Из полученных в таблице 2 значений мы видим, что при подборе диаметра трубопровода в водовыпускном сооружении параметр расхода сравнивался с требуемым расходом.

Делаем вывод о том, что диаметр ( $d$ , м) подобран верно, так как  $h_w < H$ . Это является доквадратичной областью сопротивления, по графику Никурадзе определили, что данный диаметр входит в зону II переходного режима.

Отметка оси в начале трубы будет равна  $Z_1$ :

$$Z_1 = Z_{\text{ув}_{\text{мин}}} - 2,31 + \frac{d_{\text{тр}}}{2} = 25,54 - 1,67 + \frac{0,8}{2} = 24,27 \text{ м}, \quad (14)$$

где  $Z_{\text{ув}_{\text{мин}}}$  – отметка уровня воды (минимальная), м.

Определим напор во входном оголовке водовыпускного сооружения:

$$H_{\text{вх}} = Z_{\text{ув}_{\text{мин}}} - Z_1 = 25,54 - 24,27 = 1,27 \text{ м}. \quad (15)$$

Проверяем уклон трубопровода:

$$i_{\text{тр}} = \frac{Z_1 - Z_2}{l_{\text{тр}}} \leq 0,1\text{--}0,25, \quad (16)$$

где  $Z_2$  – отметка оси в сечении, м,

$$i_{\text{тр}} = \frac{23,86 - 23,56}{20,18} = 0,0149 \leq 0,1.$$

Общая длина трубопровода водовыпускного сооружения без учета шахты сооружения от входного оголовка, вписанного в русло ДМК, до отводящего канала:  $l_{\text{тр}} = 20,18 \text{ м}$ .

Количество отдельных сегментов трубопровода зависит от максимальной длины труб, выпускаемых фирмой «Корсис»:  $l_{\text{тр}}/6 = 20,18/6 = 3,36 \text{ м}$ . Полученное количество гофрированной трубы диаметром  $d_{\text{гофр}} = 0,8 \text{ м}$  округляем до ближайшего стандартного размера 4 м.

Отводящий канал рассчитываем исходя из требуемой пропускной способности  $Q_{\text{зад}} = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Сечение отводящего канала следует принимать гидравлически наиболее выгоднейшим. По рекомендациям, отводящий канал из монолитного железобетона с шероховатостью  $n = 0,025$ , коэффициент заложения откоса канала  $m = 2,0$ .

В первом приближении глубина воды при пропуске расчетного расхода  $Q = Q_{\text{тз}}$  определяется по формуле С. А. Гиршкана:

$$h = 1,0\sqrt[3]{Q} = 1,0\sqrt[3]{1} = 1,133 \text{ м}, \quad (17)$$

где коэффициент перед корнем, равный 1,0, рекомендуется для гидравлически наивыгоднейших сечений, для остальных сечений он равен 0,85.

Средняя расчетная скорость  $v_p$  в живом сечении назначается из условия незаиляемости отводящего канала. Так как неразмывающая скорость  $v_{\text{нер}}$  зависит от глубины воды в канале, то расчет параметров канала ведется методом приближения.

Определяем:  $v_{\text{нер}} = 0,91 \text{ м/с}$ , где  $v_{\text{нер}}$  – допускаемая неразмывающая скорость, при которой поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации размыва русла.

Незаиляющая скорость определяется по формуле С. А. Гиршкана [7]:

$$v_{\text{нез}} = A Q^{0,2} = 0,33 \cdot 1,0^{0,2} = 0,33 \text{ м/с}, \quad (18)$$

где  $v_{\text{нез}}$  – допускаемая незаиляющая скорость, при которой поток способен транспортировать наносы без их осаждения, м/с;

$A$  – эмпирический коэффициент, зависящий от гидравлической крупности наносов  $w$  (скорости равномерного падения частиц наносов в неподвижной воде), принимается равным  $A = 0,33$  при  $w < 1,5 \text{ мм/с}$ .

При назначении расчетной скорости в отводящем канале из условия незаиляемости и неразмываемости необходимо учитывать следующие рекомендации [8, 9]. С целью уменьшения объема земляных работ каналы в земляных руслах следует проектировать на максимально допустимую скорость с проверкой условия  $v_p = 0,9v_{\text{нер}} > v_{\text{нез}}$ .

За расчетную скорость воды в канале принимается:

$$v_p = 0,9v_{\text{нер}} > v_{\text{нез}}, \quad (19)$$

где  $v_{\text{нер}}$  – допускаемая неразмывающая скорость течения, м/с;

$v_{\text{нез}}$  – допускаемая незаиляющая скорость, м/с.



$$v_p = 0,9 \cdot 0,91 = 0,819 > 0,33 \text{ м/с.}$$

Вычисляем площадь живого сечения потока:

$$\omega_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{зад}}}{v_p} = \frac{1,0}{0,819} = 1,22 \text{ м}^2. \quad (20)$$

Определяется относительная ширина гидравлически наивыгоднейшего сечения канала по дну:

$$\beta_{\text{г.н.}} = \frac{b}{h_{\text{г.н.}}} = 2(\sqrt{1 + m^2} - m) = 2(\sqrt{1 + 2^2} - 2) = 0,47, \quad (21)$$

где  $b$  – ширина канала, м;

$h_{\text{г.н.}}$  – наименьшая глубина воды, м;

$m$  – коэффициент заложения откосов.

Определяем окончательную ширину гидравлически наивыгоднейшего сечения канала по дну:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{г.н.1}} &= \beta_{\text{г.н.}} + 2(\sqrt{1 + m^2} - m \cdot \sqrt{1 + m^2}), \\ \beta_{\text{г.н.1}} &= 0,47 + 2(\sqrt{1 + 2,0^2} - 2 \cdot \sqrt{1 + 2,0^2}) = 1,925. \end{aligned} \quad (22)$$

Во втором приближении из формулы площади  $\omega' = (b + m \cdot h) \cdot h = (\beta + m) \cdot h^2$  уточняется глубина воды в канале гидравлически наивыгоднейшего сечения:

$$h_{\text{г.н.}} = \sqrt{\frac{\omega'}{\beta_{\text{г.н.}} + m}} = \sqrt{\frac{1,221}{1,925 + 2,0}} = 1,623 \text{ м.} \quad (23)$$

По полученной глубине уточняется:

$$v_{\text{нр}} = 1,11 \text{ м/с,}$$

$$v_p = 0,9 \cdot 1,11 = 0,999 \text{ м/с} > 0,33 \text{ м/с.}$$

Уточняем для нового значения расчетной скорости:

$$\omega'_{\text{расч}} = \frac{Q_{\text{зад}}}{v_p} = \frac{1,0}{0,972} = 1,029 \text{ м}^2,$$

$$h_{г.н.} = \sqrt{\frac{\omega}{\beta_{г.н.} + m}} = \sqrt{\frac{1,029}{1,925 + 2,0}} = 1,592 \text{ м},$$

$$b = \beta_{г.н.} h_{г.н.} = 3,056 \text{ м.} \quad (24)$$

Полученную ширину отводящего канала округляем до ближайшего стандартного размера  $b = 3,0$  м.

По стандартной ширине канала по дну окончательно определяем нормальную глубину гидравлически наивыгоднейшего сечения [10, 11]:

$$h_{г.н.} = \frac{-b \cdot \sqrt{b^2 + 4 \cdot m \cdot \omega_0}}{2m} = \frac{-3 + \sqrt{3,0^2 + 4 \cdot 2,0 \cdot 1,029}}{2 \cdot 2,0} = 1,133 \text{ м}, \quad (25)$$

где  $\omega_0$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ .

Полученная глубина в отводящем канале  $h_{г.н.} = 1,133$  м будет являться гидравлически наивыгоднейшим сечением в канале.

Вычисляем гидравлические элементы живого сечения потока:

- смоченный периметр:

$$\chi_0 = b + 2 \cdot h_{г.н.} \cdot \sqrt{1 + m^2} = 3,0 + 2 \cdot 1,133 \cdot \sqrt{1 + 2,0^2} = 8,133 \text{ м}; \quad (26)$$

- гидравлический радиус:

$$R_0 = \frac{\omega_0}{\chi_0} = \frac{1,029}{8,133} = 0,127 \text{ м} \quad (27)$$

где  $\chi_0$  – смоченный периметр.

Находим коэффициент Шези  $C = 24,04$  и вычисляем:

$$i_0 = \frac{v_p^2}{C_0^2 \cdot R_0} = \frac{1,0^2}{24,04^2 \cdot 0,127} = 0,000207. \quad (28)$$

Принимаем превышение бровки канала  $\Delta h = 0,3$  м над уровнем воды:

$$H_{стр} = h_{г.н.} + \Delta h = 1,133 + 0,3 = 1,433 \text{ м.} \quad (29)$$

где  $H_{стр}$  – строительная высота, м.

Теперь знаем глубину в отводящем канале  $h_{г.н.} = 1,133$  м, максимальный уровень воды в русле канала ДМК  $УВ_{МАКС} = 26,18$  м и минимальный

уровень воды в русле канала ДМК  $УВ_{\text{МИН}} = 25,54$  м, при котором водовыпускное сооружение будет пропускать требуемый расход из расчета  $Q_{\text{зад}} = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . Определяем разницу уровней воды в русле канала ДМК и в отводящем канале при  $УВ_{\text{МАКС}}$  и  $УВ_{\text{МИН}}$ .

Определение отметки уровня воды в канале  $Z_{\text{УВ.ОК}}$ :

$$Z_{\text{УВ.ОК}} = Z_{\text{ДНО.ОК}} + h_{\text{т.н.}} = 23,56 + 1,133 = 24,693 \text{ м БС}, \quad (30)$$

где  $Z_{\text{УВ.ОК}}$  – отметка уровня воды в отводящем канале, м;

$Z_{\text{ДНО.ОК}}$  – отметка дна отводящего канала, м.

Определение  $Z$  при максимальном уровне воды  $Z_{\text{УВмакс}}$ :

$$Z = Z_{\text{УВмакс}} - Z_{\text{УВ.ОК}} = 26,18 - 24,693 = 1,487 \text{ м БС}. \quad (31)$$

Определение  $Z$  при минимальном уровне воды  $Z_{\text{УВмин}}$ :

$$Z = Z_{\text{УВмин}} - Z_{\text{УВ.ОК}} = 25,54 - 24,693 = 0,85 \text{ м БС}. \quad (32)$$

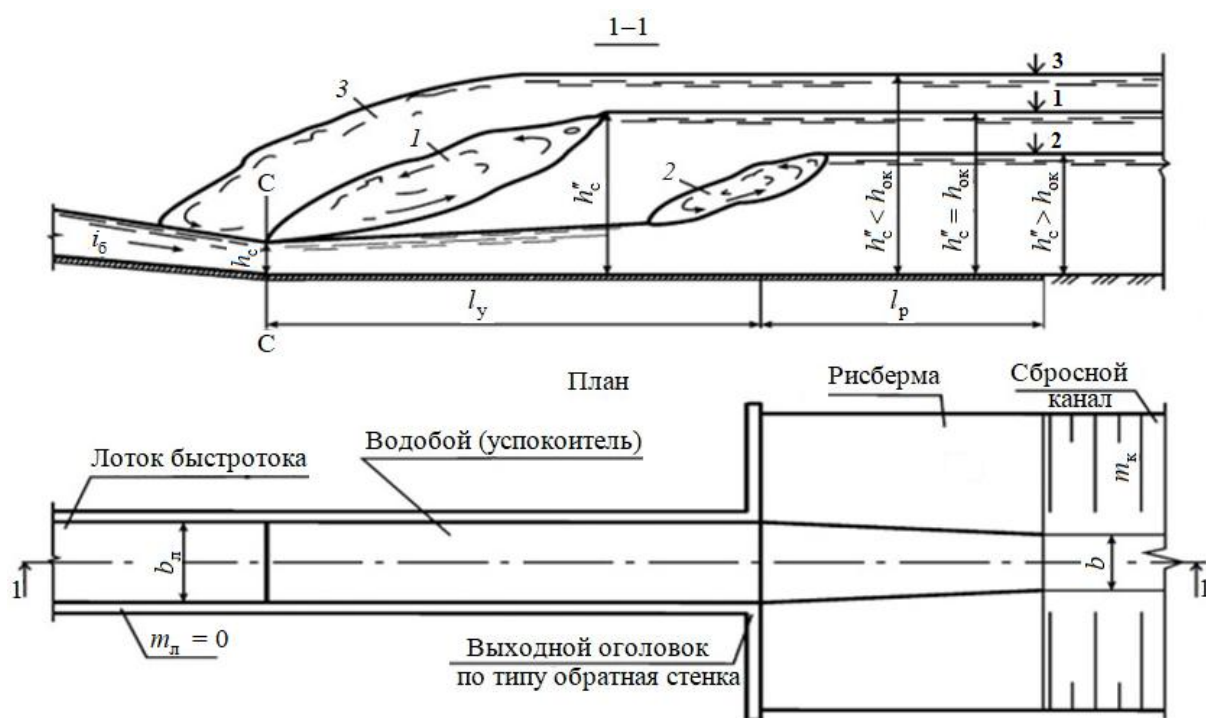
**Результаты и обсуждение.** Следует отметить, что наиболее ответственной и дорогостоящей частью в сопрягающих сооружениях является выходная часть, в пределах которой происходит сопряжение бурного потока со спокойным с помощью гидравлического прыжка и полное гашение избыточной кинетической энергии потока [12–14].

Выходная часть состоит из водобоя в виде успокоителя, в пределах которого происходит сопряжение потоков, и концевого крепления, называемого рисбермой (рисунок 1).

В пределах рисбермы располагается послепрыжковый участок. Здесь происходит расширение спокойного потока, выравнивание эпюры скоростей и затухание пульсаций (скоростей, давлений) до бытовых, отвечающих условиям плавно изменяющегося движения в отводящем русле.

Расчет выходной части заключается в выборе конструкции успокоителя, определении формы сопряжения бурного потока со спокойным с помощью гидравлического прыжка, расчете гасителя энергии, назначении

основных размеров, обеспечивающих безаварийную, надежную работу сооружения.



- 1 – прыжок в сжатом сечении ( $h_c'' = h_{ок}$ ); 2 – отогнанный прыжок ( $h_c'' > h_{ок}$ );  
3 – затопленный прыжок ( $h_c'' < h_{ок}$ );  $l_p$  – длина рисбермы, м;  $l_y$  – длина участка, м;  
 $i_6$  – уклон бассейна;  $h_c$  – высота стенки, м;  $m_k$  – коэффициент заложения  
откоса канала;  $m_l$  – коэффициент заложения откоса лотка;  
 $b$  – ширина дна, м;  $b_l$  – ширина лотка, м
- 1 – jump in contracted section ( $h_c'' = h_{ок}$ ); 2 – repelled jump ( $h_c'' > h_{ок}$ );  
3 – submerged jump ( $h_c'' < h_{ок}$ );  $l_p$  – apron length, m;  $l_y$  – site length, m;  
 $i_6$  – basin slope;  $h_c$  – wall height, m;  $m_k$  – ratio of fume slope;  
 $m_l$  – ratio of slope;  $b$  – bottom width, m;  $b_l$  – flume width, m

**Рисунок 1 – Схема выходной части водовыпускного сооружения**  
**Figure 1 – Scheme of the outlet section of the water outlet conduit**

Часто ширина отводящего русла канала бывает больше ширины лотка, поэтому водобойная часть – успокоитель может устраиваться непризматическим (расширяющимся) или выполняться призматическим, т. е. постоянного сечения.

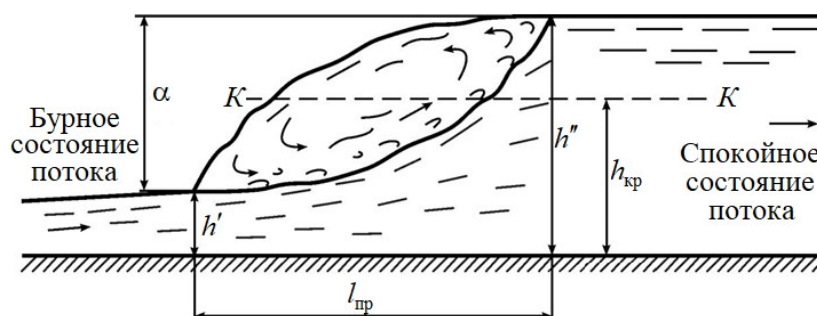
Переход от прямоугольной формы сечения успокоителя к трапециевидному сечению канала удобно осуществить с помощью выходного ого-

ловка по типу обратная стенка (см. рисунок 1). Уклон дна выходной части принимается равным  $i_0 = 0$ .

За успокоителем для защиты канала от размыва на послепрыжковом участке и участке растекания потока до бытовых условий предусматривается устройство концевое бетонного крепления, габионов, каменной наброски (рисбермы).

В нижнем бьефе гидротехнических сооружений можно выделить сечение, называемое сжатым, которое отличается от других сечений минимальной площадью и максимальной скоростью воды. Для водовыпускного сооружения таким сжатым сечением является сечение в трубопроводе, глубина в котором, называемая сжатой глубиной, была определена из расчета  $d_{тр}$  по способу профессора В. И. Чарномского [15–17].

Так как в сжатом сечении  $h_c < h_{кр}$  и поток всегда находится в бурном состоянии, а в отводящем русле  $h_{г.н.} > h_{кр}$ , что соответствует условиям спокойного состояния, то переход из бурного состояния в спокойное возможен только с помощью гидравлического прыжка (рисунок 2).



$h'$  – глубина водного потока, м;  $h_{кр}$  – критическая глубина, м;  $l_{пр}$  – длина прыжка, м;

$h''$  – высота прыжка, м;  $\alpha$  – разница между высотой и длиной прыжка, м

$h'$  – water flow depth, m;  $h_{кр}$  – critical depth, m;  $l_{пр}$  – jump length, m;

$h''$  – jump height, m;  $\alpha$  – the difference between the height and length of jumps, m

**Рисунок 2 – Схема гидравлического прыжка**

**Figure 2 – Hydraulic jump scheme**

Глубины  $h'$  в начале прыжка и  $h''$  в конце его называются сопряженными или взаимными (рисунок 2). Разность между сопряженными глу-

бинами  $h'' - h' = \alpha$  называется разницей между высотой и длиной прыжка. Длина  $l_{\text{пр}}$  называется длиной прыжка.

Вычисляем  $h_{\text{кр}}$ , м, для определения формы сопряжения потоков в нижнем бьефе отводящего канала и за водобойной стенкой:

$$h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{a \cdot Q^2}{g \cdot b}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 1,0^2}{9,81 \cdot 0,8}} = 0,5596 \text{ м.} \quad (33)$$

Для трапецеидального русла основное уравнение упрощается, приводится к квадратному, а в результате его решения получены зависимости, выражающие связь между сопряженными глубинами:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{\text{кр}}}{h_2} \right)^3} - 1 \right], \quad (34)$$

где  $h_2$  – глубина во втором створе, м;

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{\text{кр}}}{h_1} \right)^3} - 1 \right]. \quad (35)$$

Для прыжка, образованного в сжатом сечении С–С, зависимость имеет вид:

$$h_c'' = \frac{h_c}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{h_{\text{кр}}}{h_c} \right)^3} - 1 \right] = \frac{0,8}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{0,5596}{0,8} \right)^3} - 1 \right] = 0,636 \text{ м,} \quad (36)$$

где  $h_c''$  – вторая сопряженная со сжатой глубина, м. Сопряжение бьефов будет затопленным.

*Порядок установления формы сопряжения потоков в выходной части водовыпуска.*

По вышеприведенной зависимости определяется  $h_c''$  – вторая сопряженная со сжатой глубина, здесь  $h_c$  – сжатая глубина – будет являться диаметром трубопровода.

Сравнивая  $h_c''$  с бытовой глубиной в отводящем канале, равной нормальной глубине  $h_b = h_{т.н.}$ , определяем форму сопряжения бьефов.

В зависимости от места расположения гидравлического прыжка относительно сжатого сечения С–С различают три формы сопряжения бьефов (потоков).

1 Если  $h_c'' = h_{т.н.}$ , то наблюдается критическая форма сопряжения (первый тип сопряжения), при которой начало прыжка располагается в сжатом сечении С–С. Эта форма сопряжения является неустойчивой и не может быть принята за расчетную.

2 Если  $h_c'' > h_{т.н.}$ , то сопряжение происходит по типу отогнанного прыжка (второй тип сопряжения), при котором начало прыжка будет расположено правее сжатого сечения С–С, а сам прыжок может быть отогнан даже за пределы успокоителя на рисберму или в отводящий канал.

3 Если  $h_c'' < h_{т.н.}$ , то имеем устойчивую форму сопряжения бьефов по типу затопленного прыжка (третий тип сопряжения). Сжатое сечение С–С будет затоплено прыжком, начало которого располагается в пределах трубы.

Если в результате сравнения окажется, что  $h_c'' = h_{т.н.}$ , то в этом случае, как было указано выше, гидравлический прыжок будет затоплен без устройства гасителей энергии, тогда длина водобойной части – успокоителя в рассматриваемом случае определяется по зависимости:

$$l_y = (1,0...1,25)l_{з.пр.}, \quad (37)$$

где  $l_{з.пр.}$  – длина затопленного прыжка, м.

За водобойной стенкой устанавливается рисберма, в пределах которой происходит уже в спокойном состоянии выравнивание эпюры распределения скоростей, затухание пульсации скоростей, давлений, соответствующих условиям плавно изменяющегося движения в отводящем канале. На рисберме поток обладает еще повышенной размывающей скоростью,

поэтому крепление в нижнем бьефе сооружений заканчивается, как правило, в концевом сечении рисбермы [18–20].

Длина рисбермы принимается равной  $l_p = (1,0...2,0)l_y$ .

В случае отгона гидравлического прыжка или критической формы сопряжения бьефов для его затопления может быть применен один из известных гасителей энергии (водобойная стенка, водобойный колодец, комбинированный водобойный колодец).

Из расположения гидравлического прыжка относительно сжатого сечения С–С, которое является сечением трубопровода водовыпускного сооружения, определяется форма сопряжения бьефов (потоков). Так как  $h_c'' < h_{г.н.}$ ,  $0,373 < 1,133$ , то имеем устойчивую форму сопряжения бьефов по типу затопленного прыжка (третий тип сопряжения), начало которого располагается в пределах трубы.

Расчет выходной части заключается в расчете сопряжения бьефов и гасителей энергии, назначении основных размеров, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию сооружения [21].

За водобойной стенкой образуется новый гидравлический прыжок, поэтому для расчета формы сопряжения должны быть известны сжатая глубина за стенкой  $h_{c1}$  и вторая сопряженная со сжатой глубина  $h_c''$ .

Сжатая глубина за стенкой в сечении С<sub>1</sub>–С<sub>1</sub> определяется из уравнения расхода, полученного с использованием уравнения Бернулли для сечений перед стенкой:

$$Q' = \varphi \omega_{c1} \sqrt{2g(E_0 - h_{c1})}, \quad (38)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости, учитывающий потери удельной энергии между сечениями, в расчетах рекомендуется принять  $\varphi = 0,85$ ;

$\omega_{c1}$  – площадь потока в сжатом сечении с глубиной  $h_c$ :  $\omega_{c1} = b_{\pi} \cdot h_{c1}$ , м<sup>2</sup>;



$E_0$  – удельная энергия потока перед стенкой относительно дна нижнего

бьефа:  $E_0 = h_n + \frac{a\omega^2}{2g}$ , м;

$V_{CT}$  – скорость потока перед стенкой:  $V_{CT} = \frac{Q}{b \cdot h_n} = \frac{1,0}{3,0 \cdot 0,636} = 0,229$  м/с.

Задаваясь значениями  $h_c$ , подсчитываем расход  $Q$ . Расчет сводится в таблицу 3.

**Таблица 3 – Метод подбора сжатой глубины за водобойной стенкой**  
**Table 3 – Method for selecting the compressed depth behind the baffle wall**

| $h_{c1}$ | $E_0$    | $\omega_{c1}$ | $E_0 - h_c$ | $\sqrt{2g(E_0 - h_c)}$ | $Q$     | $h''_{c1}$ |
|----------|----------|---------------|-------------|------------------------|---------|------------|
| 0,1      | 0,982335 | 0,305616      | 0,882335    | 4,160699               | 0,01081 | 1,822778   |
| 0,5      |          | 1,528079      | 0,482335    | 3,076266               | 0,99892 | 0,623762   |
| 0,6      |          | 1,833695      | 0,382335    | 2,738871               | 1,53681 | 0,521056   |
| 0,55     |          | 1,680887      | 0,432335    | 2,912459               | 1,25876 | 0,569311   |
| 0,500218 |          | 1,528745      | 0,482117    | 3,075571               | 1,00000 | 0,623509   |

Зная сжатую глубину  $h_{c1}$  (м), по зависимости определяем сопряженную с ней  $h''_c$ :

$$h''_c = \frac{h_{c1}}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{кр}}{h_{c1}} \right)^3} - 1 \right]. \quad (39)$$

Задача по определению  $h_{c1}$  из приведенного расчетного уравнения решается методом подбора или последовательного приближения.

Из данных таблицы 3 определена методом подбора сжатая глубина за водобойной стенкой  $h_{c1} = 0,500218$ , сравнялись значения требуемого и полученного расхода  $Q' = Q$ , определена вторая сопряженная глубина за водобойной стенкой  $h''_{c1} = 0,623$  м.

Из расположения гидравлического прыжка относительно сжатого сечения водовыпускного сооружения определяется форма сопряжения бьефов (потоков). Так как  $h''_c < h_{г.н.}$ ,  $0,623 < 1,133$  м, то имеем устойчивую форму сопряжения бьефов по типу затопленного прыжка (третий тип сопряжения), начало которого располагается в пределах трубы [22].

Так как гидравлический прыжок с помощью водобойной стенки будет затоплен и его длина оказывается меньше длины свободного совершенного прыжка, это дает преувеличенную длину водобойного колодца, ее предлагается определить по зависимости:

$$l_{\text{кол}} = l_{\text{пад}} + l_{\text{пр1}} = 0,363 + 1,77 = 2,133 \text{ м}, \quad (40)$$

где  $l_{\text{пад}}$  – расстояние от сооружения до сжатого сечения, м;

$l_{\text{пр1}}$  – длина прыжка, образованного в сжатом сечении, м:

$$l_{\text{пр1}} = 2,5 \cdot (1,9 \cdot h_c'' - h_c) = l_{\text{пр1}} = 2,5 \cdot (1,9 \cdot 0,636 - 0,8) = 1,77. \quad (41)$$

Напор на водосливе в виде водобойной стенки  $H_0$ :

$$H_0 = h_n - P_{\text{ст}} = 0,70 - 0,2992 = 0,40 \text{ м}, \quad (42)$$

где  $h_n$  – нормальная глубина, м;

$P_{\text{ст}}$  – давление, кПа.

Площадь живого сечения потока  $\omega_b$  над водобойной стенкой с глубиной  $h_b = 0,67 \cdot H_0 = 0,67 \cdot 0,40 = 0,268$  м:

$$\omega_b = b \cdot h_b = 3,0 \cdot 0,268 = 0,83 \text{ м}^2. \quad (43)$$

Скорость потока в сечении над водобойной стенкой  $V_b$ :

$$V_b = \frac{Q}{\omega_b} = \frac{1,0}{0,82} = 1,22 \text{ м/с}. \quad (44)$$

Высота падения струи относительно дна водобоя  $y$ :

$$y = \frac{h_b}{2} + P_{\text{ст}} = \frac{0,268}{2} + 0,2992 = 0,43 \text{ м}. \quad (45)$$

Длина падения  $l_{\text{пад}}$ , которую приближенно можно определить из уравнения траектории падающей струи в виде параболы:

$$l_{\text{пад}} = V_b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot y}{9,81}} = 1,22 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,43}{9,81}} = 0,36 \text{ м}, \quad (46)$$

где  $y$  – показатель степени.

Длина концевой крепи  $l_p$  в нижнем бьефе сооружения, называемого рисбермой:

$$l_p = 1,5 \cdot l_{\text{пр1}} = 1,5 \cdot 1,77 = 2,66 \text{ м}, \quad (47)$$

где  $l_{\text{пр1}}$  – длина прыжка, м.

### Выводы

1 Сужение проектного сечения канала при прохождении земляного русла под сооружением моста и над сооружениями ливнепроводов вызывает подъем уровня воды в канале выше максимального уровня воды, что требует облицовки русла.

2 Закрепление русла камнем вызывает подъем уровня воды в канале выше максимального. Применение такого вида облицовки невозможно.

3 Использование в качестве облицовочного материала русла канала железобетонных плит позволяет пропустить проектный расход  $110 \text{ м}^3/\text{с}$  в пределах проектного сечения без выхода за максимальный уровень. При этом скорости потока не превышают допустимых показателей.

### Список источников

1. Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / под общ. ред. В. Н. Щедрина. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. 361 с. EDN: VVMLNH
2. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов, Г. Л. Лобанов, А. М. Кореньковский. М.: Мелиоводинформ, 2010. 88 с. EDN: RINMLC.
3. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Эколит, 2011. 312 с.
4. Волосухин В. А. Техническая диагностика остаточного ресурса гидротехнических сооружений водного хозяйства // Научные основы стратегии развития АПК и сельских территорий в условиях ВТО: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию образования ВолГАУ, г. Волгоград, 28–30 янв. 2014 г. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2014. Т. 3. С. 312–313. EDN: VNMGQV.
5. Сухов А. А., Никифорова Д. Н., Колотилкина В. Р. Система управления состоянием гидротехнических сооружений и совершенствование технологий его диагностики // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4(7). С. 70–82. DOI: 10.31774/2658-7890-2020-4-70-82. EDN: EVDPMZ.
6. Эколого-экономическая эффективность диагностики технического состояния водопроводящих сооружений оросительных систем / М. А. Бандурин, И. Ф. Юрченко, В. А. Волосухин, В. В. Ванжа, Я. В. Волосухин // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 7. С. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-66-71. EDN: XSCTFJ.

7. Зарубин В. В., Титаренко Д. В., Бочкарева Н. А. Использование локального управления водораспределением при повышении эффективности оросительных систем // Вестник мелиоративной науки. 2021. № 1. С. 15–19.
8. Специальные задачи гидравлики рек и каналов / Ю. Г. Иваненко, А. М. Бакштанин, А. А. Ткачев, Д. Ю. Иваненко. М.: Ред. журн. «Механизация и электрификация сел. хоз-ва», 2020. 220 с. EDN: YKFRFS.
9. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справ. пособие / А. Д. Альтшуль [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
10. Степанов П. М., Овчаренко И. Х., Скобельцин Ю. А. Справочник по гидравлике для мелиораторов. М.: Колос, 1984. 205 с.
11. Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Колганов А. В. Гидравлический расчет резервного водосброса (водослива с широким порогом) // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 4. С. 384–402. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1334> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-384-402. EDN: CHKHKN.
12. Ткачев А. А. Расчет расходов воды в магистральных каналах для неустановившегося режима течения // Гидротехническое строительство. 2009. № 3. С. 42–46. EDN: JWWEVL.
13. Косиченко Ю. М., Угроватова Е. Г. Пути решения водохозяйственных проблем в районах Нижнего Дона // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 5. С. 4–10. EDN: YNTYQN.
14. Актуальные вопросы практических исследований гидротехнических сооружений: монография / А. А. Ткачев, В. А. Белов, А. М. Анохин, Н. А. Шелестова, И. А. Арчаков, А. И. Дроздов, С. Ю. Балковой, А. А. Гунин, Д. С. Ломинога, Е. Г. Гилетин, Е. Г. Паклинов, А. М. Сапунов, Д. В. Титаренко, Е. А. Павлов, А. М. Узунов, В. А. Стрелок, С. В. Хлебников, А. А. Сазонов, Н. И. Щепилов, В. С. Костюков. Новочеркасск: Лик, 2023. 190 с. EDN: YWMTJU.
15. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162. EDN: OUXBGA.
16. Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения // Гидротехническое строительство. 2011. № 5. С. 33–38. EDN: NTVTLV.
17. Иваненко Ю. Г., Лобанов Г. Л., Ткачев А. А. Численный метод решения дифференциальных уравнений характеристик неустановившегося течения воды в открытых руслах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2000. № 1. С. 56–60. EDN: SFRTZZ.
18. Features of operation and hydraulic calculations / A. Burlachenko, O. Chernykh, N. Khanov, D. Bazarov // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 365. 03048. DOI: 10.1051/e3sconf/202336503048. EDN: ARJNLA.
19. Meliorative institutional environment: The area of state interests / V. N. Shchedrin, S. M. Vasilyev, A. V. Kolganov, L. N. Medvedeva, A. A. Kupriyanov // Espacios. 2018. Vol. 39, № 12. P. 28. EDN: XXJODZ.
20. Mohammadi A., Parvaresh Rizi A., Abbasi N. Perspective of water distribution based on the performance of hydraulic structures in the Varamin irrigation scheme (Iran) // Irrigation and Drainage. 2018. Vol. 68, iss. 2. P. 245–255. <https://doi.org/10.1002/ird.2301>.
21. Remodelling and rehabilitation of irrigation outlets in water distribution of canals in Punjab, Pakistan / T. F. Ahmed, H. N. Hashimi, A. A. Sheikh, M. A. Khan, M. A. Afzal // Mehran University Research Journal of Engineering and Technology. 2022. Vol. 41, № 1. P. 135–145. <https://doi.org/10.22581/muet1982.2201.14>. EDN: QPLHLY.

22. Nikbakht J., Talei A., Vaezi A. R. Combined effect of tape drip irrigation system looping and magnetic water on hydraulic performance of irrigation system and water use efficiency in maize // *Environment and Water Engineering*. 2022. Vol. 8, iss. 2. P. 440–452. DOI: 10.22034/jewe.2021.301186.1618.

## References

1. Shchedrin V.N. (ed.), 2015. *Osnovnye printsipy i metody ekspluatatsii magistral'nykh kanalov i sooruzheniy na nikh: monografiya* [Basic Principles and Methods of Operating Main Canals and Structures on Them: monograph]. Novocherkassk, RosNIIPM, 361 p., EDN: VVMLHH. (In Russian).
2. Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Shkulanov E.I., Lobanov G.L., Korenovsky A.M., 2010. *Obespechenie bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo naznacheniya* [Security of Waterworks for Reclamation Purposes]. Moscow, Meliovodinform Publ., 88 p., EDN: RINMLC. (In Russian).
3. Kiselev P.G. [et al.], 2011. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Calculations]. 4<sup>th</sup> ed., rev. and enl. Moscow, Ekolit Publ., 312 p. (In Russian).
4. Volosukhin V.A., 2014. *Tekhnicheskaya diagnostika ostatochnogo resursa gidrotekhnicheskikh sooruzheniy vodnogo khozyaystva* [Technical diagnostics of the residual resource of hydraulic structures of water management]. *Nauchnye osnovy strategii razvitiya APK i sel'skikh territoriy v usloviyakh VTO: materialy Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konf., posvyashch. 70-letiyu obrazovaniya VolGAU* [Scientific Basics of the Strategy for the Development of the Agro-Industrial Complex and Rural Areas in the Context of the WTO: Proc. of the International Scientific-Practical Conference, Dedicated to the 70<sup>th</sup> Anniversary of the Formation of Volgograd SAU]. Volgograd, Volgograd SAU, vol. 3, pp. 312-313, EDN: VNMGQV. (In Russian).
5. Sukhov A.A., Nikiforova D.N., Kolotilkina V.R., 2020. *Sistema upravleniya sostoyaniem gidrotekhnicheskikh sooruzheniy i sovershenstvovanie tekhnologiy yego diagnostiki* [Hydraulic engineering structure control system and its diagnostics technology improvement]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management], no. 4(7), pp. 70-82, DOI: 10.31774/2658-7890-2020-4-70-82, EDN: EVDPMZ. (In Russian).
6. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., Volosukhin V.A., Vanzha V.V., Volosukhin Ya.V., 2018. *Ekologo-ekonomicheskaya effektivnost' diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya vodoprovodnykh sooruzheniy orositel'nykh sistem* [Ecological and economic efficiency of diagnostics of the technical condition of water supply facilities of irrigation systems]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], vol. 22, no. 7, pp. 66-71, DOI: 10.18412/1816-0395-2018-7-66-71, EDN: XSCTFJ. (In Russian).
7. Zarubin V.V., Titarenko D.V., Bochkareva N.A., 2021. *Ispol'zovanie lokal'nogo upravleniya vodoraspredeleniem pri povyshenii effektivnosti orositel'nykh sistem* [Using local water distribution management to improve the efficiency of irrigation systems]. *Vestnik meliorativnoy nauki* [Bulletin of Land Reclamation Science], no. 1, pp. 15-19. (In Russian).
8. 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, Ed. of the journal «Mechanization and Electrification of Agriculture», 220 p., EDN: YKFRFS. (In Russian).
9. Altshul A.D. [et al.], 1988. *Gidravlicheskie raschety vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: sprav. posobie* [Hydraulic Calculations of Spillway Hydraulic Structures: reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 624 p. (In Russian).

10. Stepanov P.M., Ovcharenko I.Kh., Skobeltsin Yu.A., 1984. *Spravochnik po gidravlike dlya melioratorov* [Handbook of Hydraulics for Land Reclamation Workers]. Moscow, Kolos Publ., 205 p. (In Russian).

11. Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Kolganov A.V., 2022. [Hydraulic calculation of the reserve spillway (broad-crested weir)]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 4, pp. 384-402, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1334> [accessed 20.09.2024], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-384-402, EDN: CHKHKN. (In Russian).

12. Tkachev A.A., 2009. *Raschet raskhodov vody v magistral'nykh kanalakh dlya neustanovivshegosya rezhima techeniya* [Calculation of water flow rates in main canals for an unsteady flow regime]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 3, pp. 42-46, EDN: JWWEVL. (In Russian).

13. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., 2017. *Puti resheniya vodokhozyaystvennykh problem v rayonakh Nizhnego Dona* [The lines of approaching water industry problems in the Lower Don regions]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 5, pp. 4-10, EDN: YNTYQN. (In Russian).

14. Tkachev A.A., Belov V.A., Anokhin A.M., Shelestova N.A., Archakov I.A., Drozdov A.I., Balkovoy S.Yu., Gunin A.A., Lominoga D.S., Giletin E.G., Paklinov E.G., Sapunov A.M., Titarenko D.V., Pavlov E.A., Uzunov A.M., Strelak V.A., Khlebnikov S.V., Sazonov A.A., Shchepilov N.I., Kostyukov V.S., 2023. *Aktual'nye voprosy prakticheskikh issledovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: monografiya* [Topical Issues of Practical Research of Hydraulic Structures: monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., 190 p., EDN: YWMTJU. (In Russian).

15. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2020. *Gidravlicheskaya effektivnost' orositel'nykh kanalov pri ekspluatatsii* [Hydraulic efficiency of irrigation canals in the course of operation]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], vol. 15, no. 8, pp. 1147-1162, DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162, EDN: OUXBGA. (In Russian).

16. Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., 2011. *O problemakh bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo naznacheniya* [Issues of security of hydraulic engineering constructions for land improvement]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 5, pp. 33-38, EDN: NTVTLV. (In Russian).

17. Ivanenko Yu.G., Lobanov G.L., Tkachev A.A., 2000. *Chislennyy metod resheniya differentsial'nykh uravneniy kharakteristik neustanovivshegosya techeniya vody v otkrytykh ruslakh* [Numerical method for solving differential equations of characteristics of unsteady water flow in open channels]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Sciences], no. 1, pp. 56-60, EDN: SFRTZZ. (In Russian).

18. Burlachenko A., Chernykh O., Khanov N., Bazarov D., 2023. Features of operation and hydraulic calculations. *E3S Web of Conferences*, vol. 365, 03048, DOI: 10.1051/e3sconf/202336503048, EDN: ARJNLA.

19. Shchedrin V.N., Vasilyev S.M., Kolganov A.V., Medvedeva L.N., Kupriyanov A.A., 2018. Meliorative institutional environment: The area of state interests. *Espacios*, vol. 39, no. 12, p. 28, EDN: XXJODZ.

20. Mohammadi A., Parvaresh Rizi A., Abbasi N., 2018. Perspective of water distribution based on the performance of hydraulic structures in the Varamin irrigation scheme (Iran). *Irrigation and Drainage*, vol. 68, iss. 2, pp. 245-255, <https://doi.org/10.1002/ird.2301>.

21. Ahmed T.F., Hashimi H.N., Sheikh A.A., Khan M.A., Afzal M.A., 2022. Remodelling and rehabilitation of irrigation outlets in water distribution of canals in Punjab, Pakistan. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 135-145, <https://doi.org/10.22581/muet1982.2201.14>, EDN: QPLHLY.

22. Nikbakht J., Talei A., Vaezi A.R., 2022. Combined effect of tape drip irrigation system looping and magnetic water on hydraulic performance of irrigation system and water use efficiency in maize. Environment and Water Engineering, vol. 8, iss. 2, pp. 440-452, DOI: 10.22034/jewe.2021.301186.1618.

---

#### ***Информация об авторах***

**С. Ю. Пазынич** – магистрант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, gts\_i\_sm.nimi@mail.ru, ORCID: 0009-0001-3970-2638;

**А. А. Ткачев** – заведующий кафедрой, доктор технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, Prof\_al@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8060-620X;

**А. М. Рулевский** – аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, vodolaz.61@bk.ru, ORCID: 0009-0000-7053-8859;

**Е. А. Волкова** – ассистент кафедры гидротехнического строительства, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, 7katerina7tomashevich7@mail.ru, ORCID: 0009-0007-6471-4490.

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

**S. Yu. Pazynich** – Master's Student, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, gts\_i\_sm.nimi@mail.ru, ORCID: 0009-0001-3970-2638;

**A. A. Tkachev** – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, Prof\_al@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8060-620X;

**A. M. Rulevskiy** – Postgraduate Student, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, vodolaz.61@bk.ru, ORCID: 0009-0000-7053-8859;

**E. A. Volkova** – Assistant of the Department of Hydraulic Engineering, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, 7katerina7tomashevich7@mail.ru, ORCID: 0009-0007-6471-4490.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.*

*All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 10.07.2024; одобрена после рецензирования 31.10.2024; принята к публикации 25.03.2025.*

*The article was submitted 10.07.2024; approved after reviewing 31.10.2024; accepted for publication 25.03.2025.*