

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**
**HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY**

Научная статья
УДК 626.823.91

**Оценка эксплуатационной надежности каналов
с покрытием из бетононаполняемых материалов**

Виктория Федоровна Талалаева¹, Александр Александрович Додонов²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²aleksandr8108@gmail.com

Аннотация. Цель: оценка эксплуатационной надежности каналов с покрытием из бетононаполняемых материалов, в т. ч. бетонных матов. **Материалы и методы.** При изучении надежности различных объектов наиболее часто используются следующие законы распределения времени безотказной работы: экспоненциальный, усеченный нормальный, Релея, Гамма, Вейбулла, логарифмически нормальный. В работе использовался метод расчета по предельному состоянию для определения допускаемых (неразрывающих) донных и средних скоростей водного потока. **Результаты и обсуждение.** Для повышения эффективности и надежности гидромелиоративных сооружений было предложено использовать быстровозводимое бетононаполняемое покрытие, отличающееся водонепроницаемостью, прочностью, долговечностью и простотой укладки. В работе была представлена методика оценки надежности каналов с покрытием из бетононаполняемого материала, включающая определение допускаемой скорости водного потока в канале при заданных условиях: канал постоянного действия, удельный вес бетонного полотна с основанием – $2,73 \text{ т/м}^3$, удельный вес воды – 1 т/м^3 , среднеарифметическое сопротивление – $0,39 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Определены значения характеристики надежности канала с бетононаполняемым покрытием, допускаемые донные и допускаемые средние скорости. **Выводы.** Результаты расчета дают возможность получить вероятность работы канала без разрыва, найти характеристику надежности, а также допускаемую (неразрывающую) донную скорость и среднюю скорость потока.

Ключевые слова: надежность, оросительный канал, облицовка, коэффициент полезного действия, бетононаполняемый материал

Для цитирования: Талалаева В. Ф., Додонов А. А. Оценка эксплуатационной надежности каналов с покрытием из бетононаполняемых материалов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 1(89). С. 207–216.

Original article

Assessing the operational reliability of canals with concrete-filled coatings

Victoria F. Talalaeva¹, Aleksandr A. Dodonov²

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²aleksandr8108@gmail.com

Abstract. Purpose: reliability assessment of canals coated with concrete-filled materials, including concrete mats. **Materials and methods.** When studying the reliability of various objects, the following failure laws are most often used: exponential, truncated normal, Rayleigh, Gamma, Weibull, logarithmical normal. The limit state method to determine the permissible (non-erosive) bottom and medium velocities of the water flow was used in the work. **Results and discussion.** To increase the efficiency and reliability of land reclamation facilities, it was proposed to use a prefabricated concrete-filled coating, which is characterized by imperviousness, durability, longevity and easiness to install. The method for assessing the reliability of canals coated with concrete-filled material, including determining the permissible velocity of water flow in canal under given conditions is presented: a canal of permanent action, the specific weight of the concrete canvas with the base 2.73 t/m^3 , the water density – 1 t/m^3 , arithmetic mean resistance – $0.39 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. The values of the reliability of a canal with a concrete-filled coating, the permissible bottom and permissible average velocities are determined. **Conclusions.** The calculation results make it possible to obtain the probability of canal operation without scouring, to find the reliability characteristic, as well as the permissible (non-erosive) bottom velocity and the average flow velocity.

Keywords: reliability, irrigation canal, lining, efficiency, concrete-filled material

For citation: Talalaeva V. F., Dodonov A. A. Assessing the operational reliability of canals with concrete-filled coatings. *Ways of increasing the efficiency of irrigated agriculture*. 2023;1(89):207–216. (In Russ.).

Введение. Повышение эффективности и надежности работы гидромелиоративных сооружений является важнейшей задачей в мелиоративной отрасли. При эксплуатации каналов могут наблюдаться различные процессы, оказывающие негативное влияние на работу всей мелиоративной системы. К таким процессам можно отнести: деформации дна и откосов, заиливание, зарастание, повреждение защитных покрытий каналов, в результате чего могут возникать большие фильтрационные потери. Такие процессы являются причиной снижения эксплуатационной надежности, уменьшения коэффициента полезного действия (КПД) и срока службы каналов, а также ухудшения их общего технического состояния [1].

Под эксплуатационной надежностью каналов будем понимать способность обеспечивать эксплуатационные расходы, скорости течения, глубины, КПД в течение расчетного срока службы канала. Надежность представляет собой характеристику, которую невозможно измерить, однако можно оценить на основании опыта эксплуатации аналогичного объекта с помощью теории надежности, методов математической статистики и теории вероятностей. Надежность, определяемую на стадии эксплуатации, называют эксплуатационной надежностью [2, 3].

Вопросами надежности гидротехнических сооружений занимались многие ученые: Ц. Е. Мирцхулава, Ю. М. Косиченко, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, А. В. Колганов, А. В. Ищенко, О. А. Баев, С. В. Евдокимов и др. [1–7]. В работе Ю. М. Косиченко и др. [8] рассмотрены критерии эксплуатационной надежности каналов с облицовками из полимерных, геокомпозитных и бетононаполняемых противотрационных материалов. В работах зарубежных авторов [9–11] представлена оценка долговечности конструкций в целях обеспечения их безопасности и устойчивости. Результаты оценки эксплуатационных характеристик, работоспособности и структурной целостности бетонных и железобетонных конструкций рассмотрены в работе С. Фрайдея и др. [12].

Целью статьи является оценка эксплуатационной надежности каналов с покрытием из бетононаполняемых материалов, в т. ч. бетонных матов.

Материалы и методы. Современные методы расчетов надежности различных

сооружений делятся на детерминистические и вероятностные. Первые дают определенные расчетные условия, вторые – вероятностные. При заданных вероятностных параметрах нагрузки, материалов, размеров и формы конструкции имеется вероятность (P) ее разрушаемости. Такие параметры определяются в результате накопления и обработки статистических данных [2].

Теория надежности позволяет решать задачи надежности систем сооружений в увязке с вопросами экономики, вырабатывать организационные мероприятия для повышения надежности изучаемых систем, сооружений и их элементов. При изучении надежности различных объектов наиболее часто используются следующие законы распределения времени безотказной работы: экспоненциальный, усеченный нормальный, Релея, Гамма, Вейбулла, логарифмически нормальный [13].

Для оценки фильтрационной безопасности и эксплуатационной надежности оросительных каналов могут использоваться методы, предложенные О. М. Финагеновым и С. Г. Шульманом [3]. Оценка состояния гидротехнических сооружений с точки зрения технической системы, состоящей из множества элементов и находящейся под воздействием разнообразных нагрузок, является сложной и ответственной задачей. Объект диагностирования представляет собой, как правило, совокупность нескольких элементов, объединенных в один объект по функциональному признаку и расположению.

Среди методов технической диагностики необходимо отметить метод, основанный на обобщенной теореме (формуле) Байеса. Это одна из основных теорем теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность того или иного события (гипотезы) при наличии лишь косвенных тому подтверждений (данных) [7].

Результаты и обсуждение. Оросительные каналы предназначены для транспортировки воды водопотребителям. В настоящее время КПД многих каналов в нашей стране не превышает 0,70–0,80. Некоторые каналы имеют очень низкий КПД на уровне 0,60–0,65, поэтому большое внимание должно уделяться надежности противофильтрационных облицовок в целях обеспечения нормативного значения их КПД 0,90–0,95¹. Такие негативные процессы, как попеременное замораживание-оттаивание, заиливание, зарастание и последующее уменьшение скорости течения воды, снижают КПД по всей протяженности каналов.

Для предотвращения развития негативных процессов предлагается использовать быстровозводимое бетононаполняемое покрытие, представляющее собой гибкую, пропитанную цементом ткань, затвердевающую при гидратации с образованием тонкого, прочного, водонепроницаемого и огнестойкого бетонного слоя. Материал позволяет производить строительство без применения смесительного оборудования и крупногабаритной специализированной техники [14].

В сухом состоянии бетононаполняемый материал довольно гибкий, его поставляют в рулонах. Слой из поливинилхлорида на нижней поверхности материала обеспечивает полную водонепроницаемость, а гидрофильные волокна (полиэтиленовые и полипропиленовые нити) на противоположной поверхности способствуют гидратации, притягивая воду в цементную смесь. Гидратация покрытия осуществляется путем распыления воды или погружения материала в воду. По истечении 24 ч бетонное полотно набирает 80 % прочности [15, 16].

Далее рассмотрим методику оценки надежности каналов с покрытием из бетононаполняемого материала. Найдем допускаемую скорость в канале при следующих

¹Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. М.: Изд-во стандартов, 2017. 209 с.

условиях: канал постоянного действия, удельный вес бетонного полотна с основанием $\rho_4 = 2,73 \text{ т/м}^3$, удельный вес воды $\rho_0 = 1 \text{ т/м}^3$, среднеарифметическое сопротивление $C = 0,39 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Необходимые данные для расчета значений равнодействующей подъемного усилия P_B , Н, результирующего усилия P_L , Н, нормативного сопротивления от статического значения сцепления C_y , Н/м², и массы бетонного полотна в воде G_B , т, устанавливаем по формулам (1)–(4). При предельном состоянии решим задачу по соотношению:

$$\frac{P_B}{m_p F} + \frac{P_L \delta_1 d}{m_n \omega} \leq C_y + \frac{G_B}{F}, \quad (1)$$

где P_B – равнодействующая подъемного усилия, Н;

m_p , m_n – коэффициенты условий деформации материала соответственно на растяжение и изгиб;

F – площадь опорной части бетонного полотна, м²;

P_L – лобовое результирующее усилие, Н;

δ_1 – плечо силы лобового сопротивления, м;

d – толщина материала, м;

ω – момент сопротивления опорной части, м³;

C_y – нормативное сопротивление от статического значения сцепления, кПа;

G_B – масса бетонного полотна в воде, кг.

Нормативное сопротивление от статического значения сцепления:

$$C_y = 0,035 \cdot C_{ш}, \quad (2)$$

где $C_{ш}$ – статистическое значение сцепления грунта, кПа.

Лобовое результирующее усилие P_L , Н, определяется по формуле (3), при отсутствии данных специальных исследований его значение можно приближенно принять по числу Струхала равным 0,73 [2]:

$$P_L = \rho_0 \lambda_x \frac{v_\Delta^2}{2g} \delta_2 d^2, \quad (3)$$

где ρ_0 – удельный вес воды, кг/м³;

λ_x – коэффициент лобового сопротивления;

v_Δ – скорость течения воды, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

δ_2 – коэффициент равномерности, принимаемый по данным Ц. Е. Мирцхулавы [2].

Равнодействующая подъемного усилия P_B , Н, определяется по формуле:

$$P_B = \rho_0 \lambda_y \frac{v_\Delta^2}{2g} \delta_3 d^2, \quad (4)$$

где λ_y – коэффициент подъемного усилия (по данным Ц. Е. Мирцхулавы [2] $\lambda_x = 0,4 \dots 0,45$; $\frac{\lambda_x}{\lambda_y} = 0,25$);

δ_3 – коэффициент равномерности, принимаемый по данным Ц. Е. Мирцхулавы [2];

$\delta_3 \cdot d^2$ – площадь миделя для подъемного усилия, м².

Масса бетонного полотна в воде G_B , кг:

$$G_B = \frac{\pi}{6} (\rho_4 - \rho_0) d^3,$$

где π – математическая постоянная;

ρ_4 – удельный вес материала, кг/м³.

Площадь опорной части бетонного полотна:

$$F = \frac{\pi}{4} (\delta_4 d)^2,$$

где δ_4 – коэффициент равномерности, принимаемый по данным Ц. Е. Мирцхулавы [2].

Момент сопротивления опорной части:

$$\omega = 0,0982 (\delta_4 d)^2.$$

Подставляя соответствующие значения в уравнение (1) и выразив из него сопротивление C_y , получаем:

$$C_y = \frac{\rho_0 v_\Delta^2}{2gm} \left[\frac{4\lambda_y \delta_3}{\pi \delta_4^2} + \frac{\lambda_x \delta_2 \delta_1}{0,0982 \delta_4^3} \right] - \frac{2 (\rho_4 - \rho_0)}{3 \delta_4^2} d,$$

где m – коэффициент условий работы материала на растяжение и изгиб (для данного расчета с приемлемой точностью принимаем $m_p = m_n = m$).

Приняв осредненные значения коэффициентов $\lambda_x = 0,42$, $\lambda_y = 0,10$, $\delta_1 = 0,4$, $\delta_2 = 0,5$, $\delta_3 = 0,785$, $\delta_4 = 0$, получаем решение уравнения:

$$1,3 \frac{\rho_0}{g} v_\Delta^2 = 2m [0,8(\rho_4 - \rho_0)d + C_y].$$

Обозначив левую часть уравнения через τ_{v_Δ} , получим:

$$1,3 \frac{\rho_0}{g} v_\Delta^2 = \tau_{v_\Delta}, \quad (5)$$

где τ_{v_Δ} – суммарное напряжение отрыва, обусловленное воздействием потока на материал.

Среднее число выбросов в единицу времени v_{R_d} найдем из выражения:

$$v_{R_d} = \bar{v}_{\tau_{v_\Delta}} \exp \left[- \frac{(R_d - \tau_{v_\Delta})}{2\sigma_{\tau_{v_\Delta}}^2} \right],$$

где $\bar{v}_{\tau_{v_\Delta}}$ – число выбросов дисперсии напряжения;

R_d – уровень напряжения сопротивления размыву, МПа;

$\sigma_{\tau_{v_\Delta}}$ – среднеквадратическое отклонение суммарного напряжения отрыва τ_{v_Δ} .

Вероятность P появления n превышений уровня напряжения сопротивления размыву R_d за время T запишем в виде:

$$P = \frac{(Tv)^n}{n!} e^{-Tv}, \quad (6)$$

где P – вероятность появления числа превышений уровня напряжения сопротивления материала;

T – гарантийный срок службы облицовки из бетононаполняемого материала, лет;

n – число превышений уровня напряжения сопротивления материала;

v – средняя частота выбросов в единицу времени, 1/год.

Математическое ожидание числа выбросов является единственным параметром, входящим в выражение (6), тогда при $n = 0$ имеем:

$$P = e^{-vT}. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (6) и (7) относительно $\tau_{v\Delta}$, найдем:

$$\bar{\tau}_{v\Delta} = \frac{\bar{R}_d}{1 + \frac{\sqrt{\sigma_{v\Delta}^2 + \sigma_{R_d}^2}}{\bar{\tau}_{v\Delta}} \sqrt{-2 \ln \left(\frac{-\ln P}{\rho_0 T \bar{v}_{\tau_{v\Delta}}} \right)}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{v\Delta}$ – среднеквадратическое отклонение скорости течения v_{Δ} ;

σ_{R_d} – среднеквадратическое отклонение сопротивляемости R_d ;

$\bar{v}_{\tau_{v\Delta}}$ – число выбросов напряжений отрыва.

Таким образом, характеристика надежности облицовки канала из бетононаполняемого материала η_n может быть представлена в следующем виде:

$$\eta_n = 1 + \frac{\sqrt{\sigma_{\tau_{v\Delta}}^2 + \sigma_{R_d}^2}}{\bar{\tau}_{v\Delta}} \sqrt{-2 \ln \left(\frac{-\ln P}{\bar{v}_{\tau_{v\Delta}} \cdot T \cdot \rho_4} \right)}.$$

Тогда уравнение (5) с учетом характеристики надежности можно записать в виде:

$$\frac{\eta_n}{m} \bar{\tau}_{v\Delta} = \bar{R}_d.$$

Выполняя аналогичные преобразования, получим зависимости для допускаемых (неразмывающих) донных и средних скоростей потока:

$$U_{n, \text{доп}} = \left(\lg \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2gm}{2,6\rho_0\eta_n} [(\rho_4 - \rho_0)d + 1,25(C_y)]}, \quad (9)$$

$$U_{\Delta n, \text{доп}} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm}{2,6\rho_0\eta_n} [(\rho_4 - \rho_0)d + 1,25(C_y)]}, \quad (10)$$

где $U_{n, \text{доп}}$ – допускаемая средняя скорость, м/с;

$U_{\Delta n, \text{доп}}$ – допускаемая донная скорость, м/с;

H – глубина потока, м.

Задаваясь достаточно высоким значением вероятности безотказной работы облицовки ($P = 0,9$, $P = 0,95$, $P = 0,99$, $P = 0,995$, $P = 0,999$), можно установить скорости течения потока без размыва, при которых размыв основания будет практически невозможным событием для заданного срока воздействия потока T (гарантийный срок службы облицовки из бетононаполняемого материала).

При вероятности работы канала без размыва $P = 0,90$ и гарантийном сроке службы облицовки $T = 70$ лет (или $T = 2207520000$ с) по выражению (7) получим характеристику надежности, равную $\eta_n = 3,868$.

Далее по формулам (9), (10) устанавливаем допускаемую (неразмывающую) донную и среднюю скорости с заданными надежностью и сроком службы канала, которые составят $U_{\Delta n, \text{доп}} = 0,162$ м/с, $U_{n, \text{доп}} = 0,500$ м/с.

Аналогично произведем расчет при вероятностях работы канала без размыва:

$P = 0,95$, $P = 0,99$, $P = 0,995$, $P = 0,999$. Найдем допускаемые (неразрывающие) донные и средние скорости (результаты расчета представлены в таблице 1).

Таблица 1 – Результаты расчета характеристик надежности и допускаемых донных и средних скоростей потока в канале с бетононаполняемым покрытием

Table 1 – The results of calculation of the features of reliability and permissible bottom and average flow velocities in a canal with a concrete-filled coating

Вероятность работы без размыва P	Характеристика надежности η_n	Допускаемая донная скорость $U_{\Delta n_{доп}}$, м/с	Допускаемая средняя скорость $U_{н.доп}$, м/с
0,90	3,868	0,162	0,500
0,95	3,906	0,161	0,498
0,99	3,988	0,159	0,493
0,995	4,022	0,159	0,491
0,999	4,100	0,157	0,486

По результатам расчета получены характеристики надежности η_n в пределах 3,868–4,100, по которым получены значения допускаемой средней скорости водного потока на уровне 0,486–0,500 м/с.

Выводы

1 В результате длительной эксплуатации гидромелиоративных сооружений возникает необходимость реконструкции их отдельных участков. Для повышения эффективности и надежности таких сооружений необходимо использование современных строительных материалов, позволяющих существенно продлить их срок службы. Было предложено использовать быстровозводимое бетононаполняемое покрытие, отличающееся водонепроницаемостью, прочностью, долговечностью и простотой укладки.

2 В результате проведенного расчета были определены значения характеристики надежности канала с бетононаполняемым покрытием, допускаемые донные и допускаемые средние скорости. Характеристики надежности были получены в пределах 3,868–4,100, допускаемая донная скорость определена в границах 0,157–0,162 м/с, а допускаемая средняя скорость 0,486–0,500 м/с.

Список источников

1. Косиченко Ю. М., Ломакин А. В. Гибкие конструкции противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий с применением геосинтетических материалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 5(168). С. 73–79.
2. Мирцхулава Ц. Е. О надежности крупных каналов. М.: Колос, 1981. 318 с.
3. Финагенов О. М., Шульман С. Г. К вопросу оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 1999. Т. 234. С. 7–15.
4. Карпенко Н. П., Юрченко И. Ф. Классификация мероприятий безопасной эксплуатации мелиоративных систем // Природообустройство. 2016. № 1. С. 58–62.
5. Ольгаренко Д. Г. Технический уровень и эффективность эксплуатации мелиоративных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2015. № 4(20). С. 287–295. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=839> (дата обращения: 13.01.2023).
6. Бандурин М. А. Совершенствование методов продления жизненного цикла технического состояния длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инже-

нерный вестник Дона [Электронный ресурс]. 2013. № 1(24). URL: <http://www.ivdon.ru/rumagazine/archive/n1y2013/1510> (дата обращения: 13.01.2023).

7. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Многослойные конструкции противofильтрационных покрытий с бентонитовыми матами и оценка их сравнительной эффективности // Гидротехническое строительство. 2019. № 3. С. 37–43.

8. Косиченко Ю. М., Угроватова Е. Г., Баев О. А. Обоснование расчетных зависимостей фильтрационных сопротивлений конструкций облицовок каналов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2015. Т. 278. С. 35–46.

9. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. М.; Л.: Энергия, 1966. 232 с.

10. Yao J., Gu H. Durability assessment based on design-value method for structure design // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. P. 1377–1383. DOI: 10.1007/s12205-017-0094-z.

11. Yu B., Ning C., Li B. Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: Reliability and sensitivity analysis // China Ocean Engineering. 2017. Vol. 31. P. 63–73. DOI: 10.1007/s13344-017-0008-3.

12. Structural reliability and durability assessment of reinforced concrete structures / S. Freitag, K. Kremer, P. Edler, M. Hofmann, G. Meschke // Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference. 2019. P. 2229–2236. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-30934-cd.

13. Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб.: Наука, 2008. 216 с.

14. Абдразаков Ф. К., Рукавишников А. А. Исключение непроизводительных потерь водных ресурсов из оросительной сети за счет использования инновационных облицовочных материалов // Аграрный научный журнал. 2019. № 10. С. 91–94. DOI: 10.28983/asj.y2019i10pp91-94.

15. Талалаева В. Ф. К вопросу применения бетонного полотна в гидромелиоративном строительстве // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2021. № 2(82). С. 71–77.

16. Баев О. А., Талалаева В. Ф. Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 2. С. 177–191. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1285> (дата обращения: 13.01.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191>.

References

1. Kosichenko Yu.M., Lomakin A.V., 2012. *Gibkie konstruksii protivofil'tratsionnykh i beregoukrepitel'nykh pokrytiy s primeneniem geosinteticheskikh materialov* [Flexible structures of anti-seepage and coast protection coatings using geosynthetic materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Science], no. 5(168), pp. 73–79. (In Russian).

2. Mirtskhulava Ts.E., 1981. *O nadezhnosti krupnykh kanalov* [On Reliability of Large-Scale Canals]. Moscow, Kolos Publ., 318 p. (In Russian).

3. Finagenov O.M., Shulman S.G., 1999. *K voprosu otsenki ekspluatatsionnoy nadezhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [On evaluation of operational reliability of hydraulic structures]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the VNIIG named after Vedenev B.E.], vol. 234, pp. 7–15. (In Russian).

4. Karpenko N.P., Yurchenko I.F., 2016. *Klassifikatsiya meropriyatiy bezopasnoy ekspluatatsii meliorativnykh sistem* [Classification of measures for safe operation of land reclamation systems]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 58-62. (In Russian).
5. Olgarenko D.G., 2015. [Technical level and operation efficiency of operation of reclamation systems]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 4(20), pp. 287-295, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=839> [accessed 13.01.2023]. (In Russian).
6. Bandurin M.A., 2013. [Improving the methods for extending the life cycle of the technical condition of long-term operated water conveyance facilities]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, no. 1(24), available: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1510> [accessed 13.01.2023]. (In Russian).
7. Kosichenko Yu.M., Baev O.A. 2019. *Mnogosloynnye konstruksii protivofil'tratsionnykh pokrytiy s bentonitovymi matami i otsenka ikh sravnitel'noy effektivnosti* [Multilayer anti-seepage liners with bentonite mats and comparison of their effectiveness]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 3, pp. 37-43. (In Russian).
8. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., Baev O.A., 2015. *Obosnovanie raschetnykh zavisimostey fil'tratsionnykh soprotivlenii konstruksii oblitsovok kanalov* [Substantiation of the calculated dependences of the filtration resistances of canal lining structures]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the VNIIG named after Vedenev B.E.], vol. 278, pp. 35-46. (In Russian).
9. Haviland R., 1966. *Inzhenernaya nadezhnost' i raschet na dolgovechnost'* [Engineering Reliability and Long-Life Design]. Moscow, Leningrad, Energy Publ., 232 p. (In Russian).
10. Yao J., Gu H., 2018. Durability assessment based on design-value method for structure design. *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, pp. 1377-1383, DOI: 10.1007/s12205-017-0094-z.
11. Yu B., Ning C., Li B., 2017. Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: Reliability and sensitivity analysis. *China Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 63-73, DOI: 10.1007/s13344-017-0008-3.
12. Freitag S., Kremer K., Edler P., Hofmann M., Meschke G., 2019. Structural reliability and durability assessment of reinforced concrete structures. *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference*, pp. 2229-2236, DOI: 10.3850/978-981-11-2724-30934-cd.
13. Efremov L.V., 2008. *Praktika veroyatnostnogo analiza nadezhnosti tekhniki s primeneniem komp'yuternykh tekhnologiy* [Practice of Probabilistic Analysis of Reliability of Computer-Based Technologies]. St. Petersburg, Nauka Publ., 216 p. (In Russian).
14. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., 2019. *Isklyuchenie neproizvoditel'nykh poter' vodnykh resursov iz orositel'noy seti za schet ispol'zovaniya innovatsionnykh oblitsovochnykh materialov* [Elimination of unproductive losses of water resources from the irrigation network through the use of modern facing materials]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 10, pp. 91-94, DOI: 10.28983/asj.y2019i10pp91-94. (In Russian).
15. Talalaeva V.F., 2021. *K voprosu primeneniya betonnoy polotna v gidromeliorativnom stroitel'stve* [On issue of using concrete canvas in irrigation and drainage construction]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(82), pp. 71-77. (In Russian).
16. Baev O.A., Talalaeva V.F., 2022. [Design and technological solutions for irrigation canal coating formation and resurfacing]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 2, pp. 177-191, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1285> [accessed 13.01.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191>. (In Russian).

Информация об авторах

В. Ф. Талалаева – младший научный сотрудник;

А. А. Додонов – аспирант.

Information about the authors

V. F. Talalaeva – Junior Researcher;

A. A. Dodonov – Postgraduate Student.

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

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

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

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 17.02.2023; принята к публикации 28.02.2023.

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 17.02.2023; accepted for publication 28.02.2023.