

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 626.823.91

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191

Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов

Олег Андреевич Баев¹, Виктория Федоровна Талалаева²

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

¹Oleg-Baev1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

²vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

Аннотация. Цель: разработка конструктивно-технических решений для создания и восстановления разрушенных противofiltrационных бетонных облицовок оросительных каналов с применением современных строительных материалов. **Материалы и методы.** Для создания и восстановления покрытий оросительных каналов применялись разработки усовершенствованных конструктивно-технологических решений с использованием современных материалов на основе геокомпози- тов и полимеров, которые позволили наиболее эффективно и быстро производить вос- становление защитных покрытий каналов и других водопроводящих гидротехнических сооружений. Для определения удельного фильтрационного расхода через повреждения применялась методика расчета водопроницаемости противofiltrационной бетонной облицовки с учетом кольматации повреждений. **Результаты.** Разработанные на уровне заявок и патентов на изобретения технические и технологические решения отличаются повышенной эффективностью и надежностью, которые заключаются в устранении фильтрационных потерь и фильтрационных деформаций, при этом увеличивается дол- говечность ремонтируемого участка за счет повышенных физико-механических харак- теристик применяемых в составе конструкций материалов. Представленная методика расчета водопроницаемости противofiltrационной бетонной облицовки с учетом кольматации повреждений позволила определить удельный фильтрационный расход через повреждение, равный 0,112 м кв. в сут. На основании выполненного расчета воз- можно принимать решение о целесообразности реконструкции тех или иных повре- ждений бетонных облицовок каналов, в т. ч. при их кольматации. **Выводы:** приме- нение разработанных конструктивно-технических решений для ремонта повреждений облицовок оросительных каналов позволит повысить водонепроницаемость противofiltrационного покрытия, увеличить надежность и предотвратить образование под- плитных пустот под защитными бетонными и железобетонными элементами.

Ключевые слова: оросительный канал, противofiltrационная облицовка, филь- трация, геокомпозитный материал, полимер

Для цитирования: Баев О. А., Талалаева В. Ф. Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов // Мелиора- ция и гидротехника. 2022. Т. 12, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191>.

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article



Design and technological solutions for irrigation canal coating formation and resurfacing

Oleg A. Baev¹, Viktoria F. Talalaeva²

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

¹Oleg-Baev1@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

²vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

Abstract. Purpose: to develop design and technological solutions for the creation and restoration of destroyed seepage control concrete linings of irrigation canals using modern construction materials. **Materials and methods:** to create and restore the irrigation canal coatings, the projects of improved structural, process and technical solutions were used with modern materials based on geocomposites and polymers, which made it possible to restore the protective coating of canals and other water-conducting hydraulic structures most effectively and quickly. To define the specific seepage discharge through damage, a calculation method of water permeability of an impervious concrete coating was used, taking into account damage colmatation. **Results.** Process and technical solutions developed at the level of applications and patents for inventions are characterized by increased efficiency and reliability, which consist in eliminating filtration losses and deformations, while increasing the repaired area durability due to the increased physical and mechanical features of the composition material designs. The proposed calculation methodology for water permeability of an impervious concrete coating, taking into account the damage colmatation, made it possible to determine the specific seepage discharge through damage equal to 0.112 sq. m per day. On the basis of the performed calculation, it is possible to make a decision on the feasibility of reconstructing certain damage to the canal concrete lining, both during their clogging. **Conclusions:** the use of the developed design and technological solutions for irrigation canal lining damage repairing will increase the seepage control lining imperviousity, increase reliability and prevent the formation of underfloor spaces under protective concrete and reinforced concrete elements.

Keywords: irrigation canal, seepage control lining, filtration, geocomposite material, polymer

For citation: Baev O. A., Talalaeva V. F. Design and technological solutions for irrigation canal coating formation and resurfacing. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(2):177–191. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191>.

Введение. Эксплуатация каналов гидромелиоративного назначения требует длительного срока службы защитных и противотеплоизоляционных покрытий, как правило, составляющего срок эксплуатации гидротехнических сооружений мелиоративного назначения не менее 50–60 лет [1]. В результате воздействия водного потока на оросительных каналах происходит разгерметизация деформационных швов и стыков на бетонных и железобетонных облицовках, оголение арматуры, растрескивание бетона, образование пустот в подплитном пространстве, полное разрушение от-

дельных участков (карт) плит и другие разрушения, негативно влияющие на эксплуатацию всей оросительной системы.

Одним из способов снижения фильтрационных потерь воды на оросительных каналах является применение высокоэффективных противофильтрационных мероприятий и современных строительных материалов (например, геосинтетических и геокомпозитных) [2, 3]. Исследованиями, посвященными применению усовершенствованных противофильтрационных конструкций из геокомпозитов на каналах, занимались отечественные ученые и специалисты: Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко, С. В. Сольский, О. А. Баев, Е. О. Складенко, М. А. Бандурин, Н. В. Ханов, Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников и многие другие [1–10].

За рубежом технологии устройства противофильтрационных покрытий каналов, а также проблемы модернизации, возведения и эксплуатации облицовок на сооружениях оросительных систем изучены такими учеными, как К. Ding, L. Gao [11], Н. Plusquellec [12], Х. Han, X. Wang [13], Н. F. Abd-Elhamid [14] и др. [15–18].

По результатам анализа отечественных и зарубежных работ было выявлено, что существующие на сегодняшний день технологии реконструкции и восстановления облицовок оросительных каналов являются сложными, экономически не выгодными, а также требующими большого количества специализированной техники и оборудования. Поэтому немаловажным остается вопрос разработки экономически выгодных и эффективных конструктивно-технологических решений длительно эксплуатируемых бетонных и железобетонных облицовок каналов.

Традиционный ранее применяемый бетон, как правило, недолговечен (срок службы на облицовках каналов, по различным данным, составляет до 25–28 лет), подвержен растрескиванию, технологии создания отличаются высокой трудоемкостью выполнения работ. Такие геосинтетиче-

ские материалы, как геомембраны и геокомпозиты на основе бентонита и бетона, являются высокоэффективной противofильтрационной защитой. Но, несмотря на это, такие материалы имеют ряд недостатков. Например, геомембраны обладают низкой прочностью, подвержены проколам как в процессе укладки, так и в период эксплуатации (корнями растений, защитно-пригрузочным слоем). Помимо этого, применение геомембран требует тщательной подготовки основания перед их укладкой, что значительно повышает проектную стоимость работ. Основным недостатком бентонитовых матов является необходимость в устройстве довольно мощных пригрузочных слоев для их гидратации, а также низкая стойкость к воздействию циклов заморозки-оттаивания.

В связи с этим целью данного исследования является разработка конструктивно-технических решений для создания и восстановления длительно эксплуатируемых бетонных облицовок оросительных каналов с применением современных строительных материалов.

Материалы и методы. На сегодняшний день известно большое количество способов и технологий восстановления бетонных покрытий оросительных каналов. Для этого применяются различные композитные материалы, некоторые из них рассмотрены нами ниже (рисунок 1).

Одной из наиболее серьезных проблем функционирующих оросительных и магистральных каналов во всем мире являются фильтрационные потери, которые составляют значительную часть от общего объема воды. Так, например, в Ираке большинство каналов мелиоративного назначения находятся в бетонной облицовке и подвержены фильтрации через стыки облицовочных плит [14]. Целью исследований авторов А. Al-adili, О. А. Al-ameer, А. Al-sharbatl [15] было уменьшение или предотвращение фильтрации из открытых каналов за счет использования новых альтернативных традиционным материалам для заполнения швов.



Рисунок 1 – Полимерные композитные материалы, применяемые для ремонта бетонных облицовок каналов
Picture 1 – Polymer composites used for the concrete canal lining repairing

Геосинтетические цементирующие композитные маты (ГЦКМ), разработанные в 2005 г., являются относительно новой технологией материалов в мире геосинтетики и были признаны высокоэффективными для быстрого строительства, в т. ч. объектов мелиоративного назначения. Физические свойства материала были проверены авторами W. Crawford, M. Kujawsk [17] путем проведения лабораторных испытаний. В рамках процесса оценки эффективности материал был применен на участке канала площадью около 4000 м². Расчетный срок службы превышает 50 лет, материал прост в монтаже и эксплуатации, а экономия затрат по сравнению с возведением бетонной облицовки составляет порядка 24 % [18].

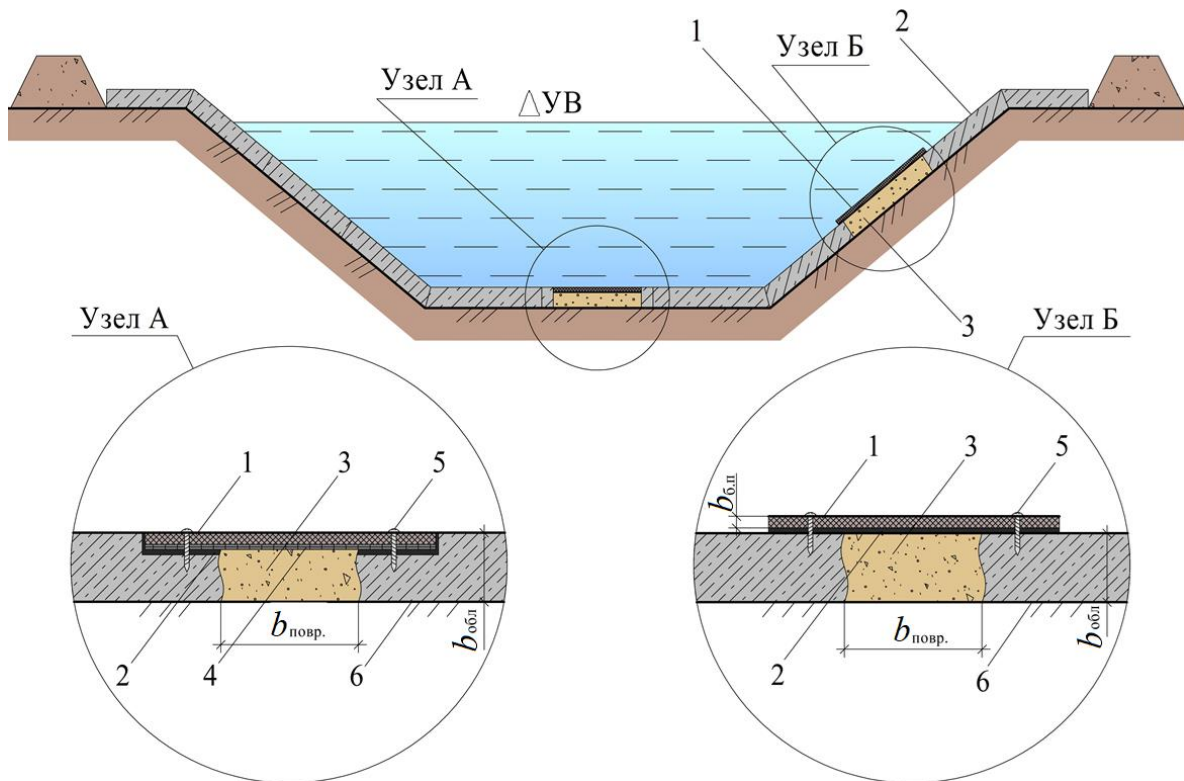
Образование трещин в бетонных покрытиях, как правило, происходит в результате изменения наружных и внутренних нагрузок вследствие несоблюдения технологий эксплуатации бетонных покрытий, неверного соотношения при приготовлении раствора и нарушения способов его укладки, а также старения покрытия под воздействием внешних и температурных факторов. Для устранения трещин бетонных облицовок применяется метод кольматации с использованием различных полимерных до-

бавок. Данный метод заключается в понижении капиллярного влагонасыщения бетонных поверхностей устройством кольматации порового пространства бетона материалами, проницаемость которых значительно меньше бетона. Влекомые водным потоком наносы заполняют повреждения, трещины, стыки и деформационные швы бетонных облицовок, тем самым уменьшаются потери воды на фильтрацию. Кольматация оросительных каналов является «простым» и в то же время достаточно эффективным противofiltrационным мероприятием, снижающим потери воды на фильтрацию в 3–6 раз [1].

В работе X. Han, X. Wang, Y. Zhu, J. Huang [13] были обследованы трещины и отверстия в различных облицовочных покрытиях, а также проведена оценка фильтрационных потерь. Результаты показали, что трещины в стыках двух сборных бетонных плит и отверстия в геомембране являются причиной увеличения потерь на фильтрацию. Использование новой комбинированной облицовки из бетона и геомембраны уменьшает фильтрацию на 86 % по сравнению с земляным руслом, в то время как через 3 года эксплуатации фильтрация может быть уменьшена на 68 %. Авторами X. Han, X. Wang, Y. Zhu, J. Huang [13] установлена статистическая связь между уменьшением фильтрации и временем ремонта канала, что позволило оценить потери воды на фильтрацию из облицованных каналов. Согласно проведенным авторами расчетам (без учета влияния срока службы облицовки) потери на фильтрацию недооцениваются на 58 %, а эффективность использования воды в канале переоценивается.

Результаты. Для проведения ремонта повреждений бетонных облицовок (локальных крупных разрушений и деформационных швов) каналов и других водопроводящих гидротехнических сооружений, выполненных с бетонными и железобетонными покрытиями, разработан способ ремонта повреждений облицовок каналов с применением бетононаполняемых ма-

териалов (по заявке на изобретение № 2021114403). Конструктивная схема проиллюстрирована на рисунке 2.



$\Delta УВ$ – уровень воды; $b_{повр.}$ – ширина повреждения; $b_{обл.}$ – толщина бетонной облицовки; $b_{б.п.}$ – толщина бетонного полотна; 1 – бетонное полотно; 2 – бетонная облицовка; 3 – засыпка; 4 – саморез; 5 – слой полимерного герметика; б – основание
 $\Delta УВ$ – water table; $b_{повр.}$ – damage width; $b_{обл.}$ – concrete coating thickness; $b_{б.п.}$ – concrete sheet thickness; 1 – concrete cloth; 2 – concrete lining; 3 – backfill; 4 – self-tapping screw; 5 – sealant polymer layer; б – base

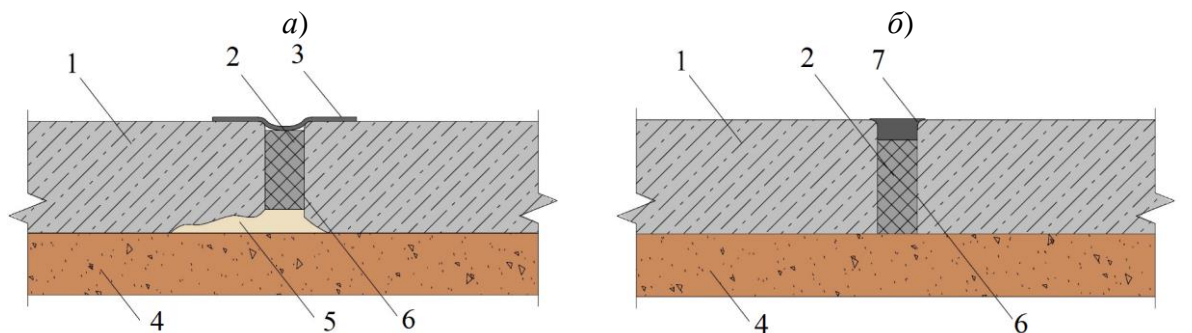
Рисунок 2 – Способ ремонта крупных повреждений бетонной облицовки по дну (узел А) и на откосе (узел Б)

Figure 2 – Method of repairing concrete lining major damages along the bottom (node A) and on the slope (node B)

Способ включает подготовку дефектного участка, которая заключается в расчистке, удалении остатков разрушенного бетона и пыли. Далее осуществляется нанесение связующего материала, образующего адгезионный слой, заполнение дефектного участка строительным материалом (засыпка из гравия мелкой фракции или песка), его разравнивание и уплотнение. Для ремонта крупных повреждений на бетонных облицовках каналов при-

меняется быстровозводимое бетононаполняемое покрытие, устраиваемое в виде заплаты поверх дефектного участка и крепящееся к поверхности противофильтрационной бетонной или железобетонной облицовки с помощью саморезов, анкеров или других крепежных элементов. Для обеспечения герметизации соединения быстровозводимого покрытия с бетонной облицовкой устраивается адгезионный слой из полимерного герметика. Предотвращение провисания заплаты достигается укладкой плоской георешетки на поверхность бетонной облицовки. Данное решение отличается простотой монтажа, низкими трудозатратами, а также отсутствием необходимости применения крупногабаритной специализированной техники.

Для ремонта деформационных швов и стыков бетонных и железобетонных покрытий разработано конструктивно-технологическое решение для восстановления бетонных облицовок с применением фибробетона и других композитных материалов (рисунок 3).



a – с использованием полиуретанового герметика / *a* – using polyurethane sealant

б – с использованием эластичной гидроизоляции на цементной основе / *b* – using elastic cement-based waterproofing

1 – бетонная облицовка; 2 – деформационный шов;

3 – полиуретановый герметик; 4 – основание; 5 – геополимерный состав;

6 – фибробетон; 7 – эластичная гидроизоляция на цементной основе

1 – concrete lining; 2 – deformed joint; 3 – polyurethane sealant; 4 – base; 5 – geopolymer composition; 6 – fiber-reinforced concrete; 7 – elastic cement-based waterproofing

Рисунок 3 – Конструктивно-технологические решения по ремонту деформационных швов композитами

Figure 3 – Design and technological solutions for repairing the deformed joints with composites

Данное конструктивно-техническое решение, направленное на восстановление бетонной облицовки оросительного канала, включает заполнение пустот разрушенного деформационного шва фибробетоном и нанесение на застывшую поверхность гидроизоляционного материала. При ремонте деформационного шва бетонной облицовки необходима подготовка ремонтируемого участка, которая заключается в очистке от мусора, удалении рыхлого бетона в зоне повреждения, штроблении по периметру деформируемого участка и очистке от пыли.

Вариант *а* включает заполнение разрушенного подплитного пространства геополимерным составом, стабилизирующим естественное основание и препятствующим дальнейшей просадке грунта. После застывания деформационный шов заполняется смесью фибробетона, поверх которого наносится полиуретановый герметик. Вариант *б* включает заполнение деформационного шва фибробетонной смесью, на которую после застывания наносится эластичная гидроизоляция на цементной основе.

Такие технологические решения отличаются повышенной эффективностью и надежностью, которые заключаются в устранении фильтрационных потерь, при этом увеличивается долговечность ремонтируемого участка за счет повышенных физико-механических характеристик фибробетона и других композитных материалов, используемых в составе покрытий. Помимо этого, покрытия из быстровозводимого бетононаполняемого материала обладают долговечностью и водонепроницаемостью.

Рассмотрим методику расчета водопроницаемости противofильтрационной бетонной облицовки с учетом кольматации повреждений, с помощью которой можно определять удельный фильтрационный расход через повреждение, осредненный коэффициент фильтрации и градиент напора на проницаемых границах.

Исходные данные для расчета: глубина воды в канале h_0 , м; толщина

повреждения $\delta_{\text{повр}}$, м; длина повреждения $l_{\text{повр}}$, м; толщина облицовки δ_0 , м; коэффициент фильтрации закольматированного слоя в повреждении облицовки $k_{\text{кол}}$, м/сут; среднестатистическая длина повреждения облицовки $L_{\text{повр}}$, м; длина канала L_k , м; ширина канала B_k , м; ширина повреждения m , м.

Пьезометрический напор H , м, действующий на бетонную облицовку, определим по формуле [4]:

$$H = h_0 + \delta_0.$$

Подставив значение пьезометрического напора в формулу удельного расхода через повреждение облицовки, получим, м²/сут:

$$q_{\text{ф}} = 2 \cdot k_{\text{кол}} \cdot H \cdot k'_2,$$

где k'_2 – отношение эллиптических интегралов.

Определим фильтрационный расход через закольматированное повреждение бетонной облицовки из выражения, м²/сут:

$$q'_{\text{ф}} = \frac{\pi \cdot k_{\text{кол}} (h_0 + \delta_0)}{\ln \left(\frac{\exp \left(\frac{\pi \cdot \delta_0}{\delta_{\text{повр}}} \right)}{\sin \left(\frac{\pi \cdot m}{2 \cdot \delta_{\text{повр}}} \right)} \right)}. \quad (1)$$

На основании подставленных исходных данных в известные формулы В. П. Недриги и Ю. М. Косиченко получим результаты расчета (таблица 1).

Далее сравним результаты расчета коэффициента водопроницаемости закольматированного повреждения и градиента напора в его основании.

Вычислим количество повреждений на противофильтрационной облицовке, шт.:

$$n = \frac{L_k}{l_{\text{повр}}}.$$

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета фильтрационного расхода закольматированного повреждения облицовки
Table 1 – Comparison of the results of calculating the seepage control of the lining colmated damage

Фильтрационный расход через повреждение			
Формула авторов (1)	Формула В. П. Недриги	Формула Ю. М. Косиченко (1980) – точная	Формула Ю. М. Косиченко (1980) – приближенная
$\frac{0,112}{46,1}$	$\frac{0,145}{33,0}$	$\frac{0,208}{30,2}$	$\frac{0,210}{30,9}$
Примечание – В числителе приведены удельные расходы, м ² /сут; в знаменателе – отклонение значений от формулы авторов, %.			

Площадь противофильтрационной облицовки определим по формуле, м²:

$$F_0 = B_k \cdot L_k.$$

Найдем осредненный коэффициент фильтрации облицовки с закольматированными повреждениями, см/с:

$$k'_{\text{обл}} = \frac{2 \cdot k_{\text{кол}} \cdot \delta_0 \cdot L_{\text{повр}} \cdot n}{F_0}.$$

По результатам расчета можно определять фильтрационные расходы через повреждения бетонных и железобетонных облицовок оросительных каналов и принимать решение о целесообразности реконструкции тех или иных повреждений.

Выводы

1 По результатам исследования разработаны новые конструктивно-технические и технологические решения для ремонта и восстановления длительно эксплуатируемых бетонных и железобетонных облицовок оросительных каналов. Применение таких решений позволит обеспечить водонепроницаемость противофильтрационных покрытий, повысить надежность и предотвратить образование подплитных пустот и фильтрационных деформаций. Преимущества решений заключаются в возможности ремон-

та крупных разрушений бетонных и железобетонных облицовок каналов, восстановления деформационных швов, а также более длительной дальнейшей эксплуатации сооружений. Прогнозный срок увеличения службы составляет от 8 до 12 лет.

2 Методика расчета водопроницаемости через закольматированные повреждения бетонной облицовки оросительного канала позволила определить фильтрационный расход через противофильтрационные элементы бетонных покрытий при наличии в них трещин или иных повреждений. Полученные по результатам сравнения значительные отклонения (с формулами В. П. Недриги и Ю. М. Косиченко) объясняются учетом дополнительных параметров (пьезометрического напора в отверстии экрана и других составляющих).

Список источников

1. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов: монография. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. 239 с.
2. Kosichenko Y. M., Baev O. A. Design of impervious coatings with enhanced reliability made from innovative materials // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1503–1509. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.096.
3. 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.
4. Косиченко Ю. М., Баев О. А., Гарбуз А. Ю. Оценка водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации каналов // *Вестник МГСУ*. 2016. № 7. С. 114–133.
5. Сольский С. В., Быковская С. А. Анализ основных причин нарушений противофильтрационных элементов из геомембран на гидротехнических сооружениях // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 2. С. 33–40. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.50.18.003>.
6. Давиденко В. М., Штильман В. Б., Коротких И. Е. Некоторые вопросы ремонта глубоких повреждений бетона с оголением арматуры на железобетонных конструкциях ГТС // *Гидротехника*. 2021. № 3(64). С. 85–88.
7. Косиченко Ю. М., Гарбуз А. Ю. Гидравлическая модель водопроницаемости бетонной облицовки при длительной эксплуатации канала // *Природообустройство*. 2018. № 4. С. 30–40. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-30-40.
8. Еремеев А. В., Гурьев А. П., Ханов Н. В. Исследование фильтрационных характеристик геомата с наполнителем из щебня и битум-полимера // *Природообустройство*. 2018. № 4. С. 48–53. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-48-53.
9. Абдразаков Ф. К., Рукавишников А. А. Исключение непроизводительных потерь водных ресурсов из оросительной сети за счет использования инновационных обли-

цочных материалов // Аграрный научный журнал. 2019. № 10. С. 91–94. <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i10pp91-94>.

10. Modelling of the optimal height of the variable edge of a volumetric anti-filtration geotextile coating for restoring failed water supply structures / M. A. Bandurin, I. P. Bandurina, V. V. Vanzha, P. G. Pasnichenko, V. T. Tkachenko // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064. Art. № 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012001.

11. Ding K., Gao L. Development in canal lining technology in China // Irrigation and Drainage. 2020. Vol. 69. P. 36–40. <https://doi.org/10.1002/ird.2438>.

12. Plusquellec H. Overestimation of benefits of canal irrigation projects: decline of performance over time caused by deterioration of concrete canal lining // Irrigation and Drainage. 2019. Vol. 68. P. 383–388. <https://doi.org/10.1002/ird.2341>.

13. A fully coupled three-dimensional numerical model for estimating canal seepage with cracks and holes in canal lining damage / X. Han, X. Wang, Y. Zhu, J. Huang // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 597. Art. № 126094. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126094.

14. Efficiency of using different lining materials to protect groundwater from leakage of polluted streams / H. F. Abd-Elhamid, G. M. Abdelaal, I. Abd-Elaty, A. M. Said // Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA. 2019. Vol. 68. P. 448–459. DOI: 10.2166/AQUA.2019.032.

15. Al-adili A., Al-ameer O. A., Al-sharbaty A. Experimental investigation of joint filling materials performance on preventing seepage in lined open concrete canal (laboratory and field model) // KSCE Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 20. P. 1936–1947. DOI: 10.1007/s12205-015-0818-x.

16. Elkamhawy E., Zelenakova M., Abd-Elaty I. Numerical canal seepage loss evaluation for different lining and crack techniques in arid and semi-arid regions: A case study of the river Nile, Egypt // Water (Switzerland). 2021. Vol. 13. Art. № 3135. <https://doi.org/10.3390/w13213135>.

17. Crawford W., Kujawsk M. Geosynthetic cementitious composite mats – Essential characteristics and properties // 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, Sept. Art. № 167797.

18. Applications of geosynthetics to irrigation, drainage and agriculture / E. Blond, S. Boyle, M. Ferrara, B. Herlin, H. Plusquellec, P. Rimoldi, T. Stark // Irrigation and Drainage. 2018. Vol. 68, iss. 1. P. 67–83. <https://doi.org/10.1002/ird.2300>.

References

1. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Protivofil'tratsionnye pokrytiya iz geosinteticheskikh materialov: monografiya* [Impervious Cover of Geosynthetics: monograph]. Novocherkassk, RosNIIPM, 239 p. (In Russian).

2. Kosichenko Y.M., Baev O.A., 2016. Design of impervious coatings with enhanced reliability made from innovative materials. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1503-1509, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.096.

3. Kosichenko Yu.M., Ugrovatova E.G., Baev O.A., 2015. *Obosnovanie raschetnykh zavisimostei fil'tratsionnykh soprotivlenii konstruksii oblitsovok kanalov* [Substantiation of the calculated dependences of the filtration resistances of canal lining structures]. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Bull. VNIIG named after B.E. Vedeneev], vol. 278, pp. 35-46. (In Russian).

4. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., Garbuz A.Yu., 2016. *Otsenka vodopronitsaemosti betonplenochnoy oblitsovki s zakolmatirovannymi shvami pri dlitel'noy ekspluatatsii kanalov* [Water permeability assessment of a concrete-foam lining with colmated seams in case of long-

term operation of channels]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], no. 7, pp. 114-133. (In Russian).

5. Solsky S.V., Bykovskaya S.A., 2021. *Analiz osnovnykh prichin narusheniy protivofil'tratsionnykh elementov iz geomembran na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Analysis of main causes of structural failures in impermeable geomembrane liners of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 2, pp. 33-40, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.50.18.003>. (In Russian).

6. Davidenko V.M., Shtilman V.B., Korotkikh I.E., 2021. *Nekotorye voprosy remonta glubokikh povrezhdeniy betona s ogoleniem armatury na zhelezobetonnykh konstruktivnykh GTS* [On some methods of repairing of deep concrete cracks with exposure of reinforcement on reinforced structures of hydraulic engineering structures]. *Gidrotekhnika* [Hydrotechnics], no. 3(64), pp. 85-88. (In Russian).

7. Kosichenko Yu.M., Garbuz A.Yu., 2018. *Gidravlicheskaya model' vodopronitsaemosti betonnoy oblitovki pri dlitel'noy ekspluatatsii kanala* [Hydraulic model of water permeability of the concrete lining during a continuous operation of the canal]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 30-40, DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-30-40. (In Russian).

8. Ereemeev A.V., Gur'ev A.P., Khanov N.V., 2018. *Issledovanie fil'tratsionnykh kharakteristik geomata s zapolnitelem iz shchebnya i bitum-polimera* [Research of filtration characteristics of geomat with a crushed stone and bitum-polymer filler]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 48-53, DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-48-53. (In Russian).

9. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., 2019. *Isklyuchenie neproizvoditel'nykh poter' vodnykh resursov iz orositel'noy seti za schet ispol'zovaniya innovatsionnykh oblitovochnykh materialov* [Elimination of unproductive losses of water resources from the irrigation network through the use of innovative facing materials]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 10, pp. 91-94, <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i10pp91-94>. (In Russian).

10. Bandurin M.A., Bandurina I.P., Vanzha V.V., Pasnichenko P.G., Tkachenko V.T., 2021. Modelling of the optimal height of the variable edge of a volumetric anti-filtration geotextile coating for restoring failed water supply structures. IOP Conference series: Proc. Science and Engineering, vol. 1064, art. № 012001, DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012001.

11. Ding K., Gao L., 2020. Development in canal lining technology in China. *Irrigation and Drainage*, vol. 69, pp. 36-40, <https://doi.org/10.1002/ird.2438>.

12. Plusquellec H., 2019. Overestimation of benefits of canal irrigation projects: decline of performance over time caused by deterioration of concrete canal lining. *Irrigation and Drainage*, vol. 68, pp. 383-388, <https://doi.org/10.1002/ird.2341>.

13. Han X., Wang X., Zhu Y., Huang J., 2021. A fully coupled three-dimensional numerical model for estimating canal seepage with cracks and holes in canal lining damage. *Journal of Hydrology*, vol. 597, art. № 126094, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126094.

14. Abd-Elhamid H.F., Abdelaal G.M., Abd-Elaty I., Said A.M., 2019. Efficiency of using different lining materials to protect groundwater from leakage of polluted streams. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, vol. 68, pp. 448-459, DOI: 10.2166/AQUA.2019.032.

15. Al-adili A., Al-ameer O.A., Al-sharbaty A., 2016. Experimental investigation of joint filling materials performance on preventing seepage in lined open concrete canal (laboratory and field model). *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 20, pp. 1936-1947, DOI: 10.1007/s12205-015-0818-x.

16. Elkamhawy E., Zelenakova M., Abd-Elaty I., 2021. Numerical canal seepage loss evaluation for different lining and crack techniques in arid and semi-arid regions: A case study of the river Nile, Egypt. *Water (Switzerland)*, vol. 13, art. no. 3135, <https://doi.org/10.3390/w13213135>.

17. Crawford W., Kujawsk M., 2019. Geosynthetic cementitious composite mats – Essential characteristics and properties. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sept., art. no. 167797.

18. Blond E., Boyle S., Ferrara M., Herlin B., Plusquellec H., Rimoldi P., Stark T., 2018. Applications of geosynthetics to irrigation, drainage and agriculture. Irrigation and Drainage, vol. 68, iss. 1, pp. 67-83, <https://doi.org/10.1002/ird.2300>.

Информация об авторах

О. А. Баев – старший научный сотрудник, кандидат технических наук;

В. Ф. Талалаева – младший научный сотрудник, аспирант.

Information about the authors

O. A. Baev – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences;

V. F. Talalaeva – Junior Researcher, 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 15.03.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 12.04.2022.

The article was submitted 15.03.2022; approved after reviewing 07.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.