

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕЛИОРАТИВНО- ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Научная статья

УДК 626/627

Технологии восстановления длительно эксплуатируемых бетонных гидротехнических сооружений

Александр Юрьевич Гарбуз¹, Олег Андреевич Баев²

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

¹A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

²Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

Аннотация. Цель: анализ и разработка способов восстановления бетонных элементов гидротехнических сооружений с использованием современных полимерных материалов. **Материалы и методы.** Выполнен анализ алгоритма оценки состояния гидротехнических объектов через неразрушающий контроль, фиксацию дефектов (трещины, оголение арматуры) и измерение прочности бетона. Установлено, что наибольшие разрушения гидротехнических сооружений происходят в зоне переменного уровня воды, при этом бетонные работы составляют большую часть объема ремонтов, что говорит о необходимости улучшения технологии производства работ. Анализ современных методов ремонта бетонных гидротехнических сооружений позволил систематизировать технические решения, которые направлены на восстановление конструктивной целостности и повышение их долговечности. **Результаты.** Бетонные гидротехнические сооружения чаще всего подвержены разрушению в зоне технологических швов, что приводит к водопоглощению, коррозии арматуры и дальнейшему разрушению. Процесс восстановления начинается с диагностики и механической обработки поврежденных участков, антикоррозионной защиты арматуры и др. Применяются специализированные ремонтные составы, наносимые вручную или механизированным способом, с использованием опалубки для крупных дефектов, а также напыляемые битумно-полимерные эмульсии с геотекстилем, обеспечивающие герметичность и долговечность. Выбор варианта технического решения зависит от типа повреждений, условий эксплуатации и требуемой несущей способности. **Выводы.** Использование инновационных материалов и технологий позволяет увеличить срок службы гидротехнических конструкций на 20–50 % и сократить эксплуатационные расходы. Перспективные направления включают разработку экологических и экономических технологий, а также внедрение систем автоматизированного мониторинга, комбинацию передовых материалов, технологий и цифровых решений, что обеспечивает не только восстановление, но и значительное повышение надежности гидротехнических объектов.

Ключевые слова: восстановление бетона, полимерный материал, герметизация трещин, оросительный канал, гидроизоляция

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 10 октября 2025 г.).

Для цитирования: Гарбуз А. Ю., Баев О. А. Технологии восстановления длительно эксплуатируемых бетонных гидротехнических сооружений // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 164–186.

MODERN PROBLEMS OF LAND RECLAMATION AND WATER INDUSTRIAL COMPLEX AND WAYS TO SOLVE THEM

Original article

Technologies for the long-term operated concrete hydraulic structures restoring

Alexander Yu. Garbuz¹, Oleg A. Baev²

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

¹A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

²Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

Abstract. Purpose: to analyze and develop methods for restoring concrete elements of hydraulic structures using modern polymeric materials. **Materials and methods.** An analysis of an algorithm for assessing the hydraulic structure condition through non-destructive testing, recording defects (cracks, exposed reinforcement), and measuring the concrete strength was performed. It was found that the greatest damage in hydraulic structures occurs in the zone of alternate water surface, with concrete work accounting for the great deal of repair volume, indicating the need to improve the production technology. An analysis of modern repair methods for concrete hydraulic structures made it possible to systematize technical solutions aimed at restoring structural integrity and increasing their durability. **Results.** Concrete hydraulic structures are most often susceptible to destruction in the area of technological joints, which leads to water absorption, reinforcement corrosion, and further destruction. The restoration process begins with diagnostics and mechanical treatment of damaged areas, anti-corrosion protection of reinforcement, etc. Specialized repair compounds are applied manually or mechanically, using formwork for large defects, as well as sprayed bitumen-polymer emulsions with geotextiles, which ensure tightness and durability. The choice of technical solution depends on the type of damage, operating conditions, and the required load-bearing capacity. **Conclusions.** The use of innovative materials and technologies can increase the service life of hydraulic structures by 20–50 % and reduce operating costs. The promising areas include the development of environmentally friendly and cost-effective technologies, as well as the implementation of automated monitoring systems, a combination of advanced materials, technologies, and digital solutions, which ensure not only restoration but also a significant increase in the reliability of hydraulic structures.

Keywords: concrete restoration, polymer material, crack sealing, irrigation canal, waterproofing

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “Modern problems of land reclamation and water industrial complex and ways to solve them” (Novocherkassk, October 10, 2025).

For citation: Garbuz A. Yu., Baev O. A. Technologies for the long-term operated concrete hydraulic structures restoring. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;97(3):164–186. (In Russ.).

Введение. При длительной эксплуатации водопроводящих сооружений многие конструктивные элементы полностью или частично выходят из строя из-за разрушения железобетонной конструкции, образования дефектов, нарушающих стабильную эксплуатацию. К числу таких повреждений

относятся: разрушение стыков, трещины (как продольные, так и поперечные), выбоины, сколы, а также отслоение и шелушение бетонного покрытия.

Анализ состояния железобетонных конструкций позволил выявить наиболее распространенные виды повреждений, установить их причины и разработать методы профилактики и ремонта. Учитывая сложные условия эксплуатации гидротехнических сооружений, материалы для их восстановления должны соответствовать строгим требованиям, включая водонепроницаемость, морозоустойчивость, стойкость к агрессивным средам и механическим нагрузкам. В России степень износа значительной части оросительных каналов более 50 %, что является предельным показателем и подразумевает необходимость ремонтных и работ по реконструкции с применением новейших технологий и материалов [1].

Нормативные сроки службы гидротехнических сооружений, согласно СП 58.13330.2019¹ «Гидротехнические сооружения. Основные положения», приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Нормативные сроки службы гидротехнических сооружений

Table 1 – Standard service life of hydraulic structures

Тип сооружения	Класс сооружения	Нормативный срок службы	Причина снижения срока службы
1	2	3	4
Плотины (насыпные, бетонные, арочные)	I, II	бетонные/железобетонные: 80–100 лет; насыпные (грунтовые): 50–70 лет	размыв основания, фильтрация воды; деформации из-за сейсмике (для плотин в горных районах)
Шлюзы и судопропускные сооружения	II, III	50–70 лет	механические части (затворы) изнашиваются быстрее (20–30 лет); бетонные камеры подвержены истиранию
Водосбросы и водовыпуски	I–III	50–80 лет	эрозия бетона в зонах высоких скоростей течения; кавитационное разрушение

¹СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2	3	4
Каналы	III, IV	с бетонной облицовкой 30–50 лет; в земляном русле 10–20 лет	размыв и разрушение откосов; зарастание и заиление
Дамбы	I–IV	железобетонные 60–80 лет; грунтовые 30–50 лет	перелив при паводках; суффозия (вынос ча- стиц грунта)

Сроки службы бетона, используемого в гидротехнических сооружениях (плотины, шлюзы, причалы, водосбросы, дамбы и т. д.), регламентируются специализированными нормативами (ГОСТ^{2, 3} и СП⁴ и др.), учитывающими постоянное воздействие воды, агрессивных сред, циклов замораживания-оттаивания и механических нагрузок. В таблице 2 приведены данные по срокам службы гидротехнического бетона.

Таблица 2 – Сроки службы гидротехнического бетона

Table 2 – Service life of hydraulic concrete

Тип сооружения	Срок службы, лет	Требования к бетону
Гравитационные плотины (бетонные, массивные)	100–150	B30–B40, W8–W12, F300–F500
Арочные и контрфорсные плотины	80–120	B25–B35, W6–W10, F200–F400
Водосбросы, водоводы	50–80	B25–B30, W6–W8, F150–F300
Каналы	50–70	B30–B40, W8–W12, F300–F400 + защитные покрытия
Дамбы, шлюзы	70–100	B20–B30, W6–W10, F200–F300

Эксплуатируемые бетонные гидротехнические сооружения (плотины, дамбы, каналы и др.) подвергаются постоянному воздействию агрессивных факторов: перепадов температур, гидродинамических нагрузок, коррозии арматуры, абразивного износа и химического воздействия воды. Со временем это приводит к деградации бетона, образованию трещин,

²ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия

³ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования

⁴СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85

снижению несущей способности и, как следствие, угрозе аварийных ситуаций. Учитывая критическую роль таких объектов, необходимость их своевременного ремонта становится ключевой задачей для обеспечения безопасности и долговечности.

Современные технологии восстановления бетонных гидротехнических сооружений развиваются в направлении повышения эффективности, долговечности и экологичности ремонтных материалов и методов. Традиционные подходы, такие, как торкретирование или инъектирование, дополняются инновационными решениями: применением высокопрочных композитов, наномодифицированных составов, а также методов гидроизоляционной защиты.

В этой связи целью научной работы является анализ способов и технологий восстановления бетонных элементов гидротехнических сооружений с использованием современных материалов.

Материалы и методы. Зарубежный опыт исследований [2] показывает, что для усиления объектов мелиоративной отрасли и продления срока их службы использовался метод увеличения поперечного сечения арматуры, ее замены, склеивания стальной арматуры, а также метод приклеивания армированного волокна, пластикового армирования и ряд других, которые способствовали усилению бетонных конструкций и, как следствие, меньшему их разрушению, что снижало потери водных ресурсов.

Например, в Индонезии для восстановления защитного покрытия ирригационных каналов применялись полимерные композиционные материалы [3]. Так как в Индонезии для облицовок ирригационных каналов используются только четыре вида материала (каменная кладка, бетон, грунтоцемент и ферроцемент), способ снижения потерь воды заключался в армировании стекловолокном (GFRP) в качестве альтернативного облицовочного материала.

Данное исследование было направлено на процесс создания стекло-

пластикового облицовочного материала, проверке его шероховатости, а также характеристиках расхода воды, которые выполнялись экспериментальным путем на гидравлической модели. По результатам исследования установлено, что при одинаковых значениях размеров поперечного сечения на ирригационных каналах покрытие из стеклопластикового материала более эффективно, чем покрытие из бетона и каменной кладки. На основании полученных данных выявлено, что композитные материалы из стеклопластика могут быть использованы в качестве образцов альтернативного облицовочного материала для ирригационных каналов [3].

Для комплексной оценки, мониторинга, а также способов восстановления герметизации повреждений гидротехнических объектов М. А. Бандуриным и др. [4, 5] использован последовательный алгоритм для оценки технического состояния железобетонных элементов, базирующийся на определении параметров надежности с помощью неразрушающего контроля. Фиксировались визуальные повреждения на исследуемом объекте, количество деформаций (повреждений, трещин, выбоин, оголения арматуры), а также комплексным методом оценивалась прочность бетона. Выявлено, что в деформационных швах нарушена гидроизоляция, что приводит к потере воды и повышению водопроницаемости, а следовательно, к размораживанию бетона и коррозии арматуры, что может привести к более масштабным разрушениям конструкций вплоть до нарушения эксплуатационной пригодности. На основании обнаруженных дефектов и деформаций предложено восстановить гидроизоляцию в местах стыков и трещин путем инъекций в швы и в трещины водостойкого герметика [4].

Д. С. Дубяго [6] выполнен анализ причин появления дефектов бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений мелиоративных систем. Установлено, что значительные разрушения происходят в зоне переменного уровня воды в сравнении с надводной и подводной частью, что обусловлено значительными колебаниями температуры, а также

циклами замораживания-оттаивания. Согласно анализу, на ремонты различного назначения ГТС производство бетонных и сопутствующих работ составляет 48–73 % от общего объема ремонтных работ, что указывает на необходимость совершенствования технологии ремонтов и повышения их качества. Для повышения эксплуатационной надежности бетонных и железобетонных конструкций рекомендуется при устройстве противофильтрационных облицовок использование композитной арматуры [6].

Г. В. Охапкиным разработана комплексная методика цифровой оптимизации ремонтно-восстановительных работ для гидротехнических сооружений, включающая следующие ключевые элементы:

- систематизированная классификация дефектов и повреждений по типу (трещины, сколы, коррозия арматуры); степени тяжести; локализации в конструкции;
- алгоритмизированный процесс принятия решений, содержащий: критерии выбора методов демонтажа поврежденного бетона; параметры для подбора технологии нанесения ремонтных составов, методику оптимального выбора материалов для восстановления;
- цифровую базу данных, включающую, типовые технические решения; каталог современных ремонтных материалов; экономические показатели различных технологий.

Преимущества предложенного подхода:

- универсальность применения для всех типов дефектов (от локальных повреждений до масштабных разрушений);
- повышение надежности восстановленных конструкций на 25–40 %;
- снижение стоимости ремонтных работ за счет минимизации необоснованных затрат (до 30 %) и оптимизация сроков их выполнения (на 15–25 %);
- возможность интеграции с BIM-моделированием для прогнозирования долговечности.

Данная методика позволяет перейти от эмпирического подхода к научно обоснованному выбору наиболее эффективных решений для каждого конкретного случая повреждения гидротехнических сооружений [7–9].

Существует большое количество компаний, специализирующихся на выпуске ремонтных составов для бетонных элементов конструкций. Так, например, в Полидабер⁵ используют ремонтный материал холодного отверждения, который предназначен для герметизации и ремонта сколов, выбоин, раковин и поверхностных разрушений цементобетонных монолитных и сборных покрытий. Главным преимуществом таких ремонтных составов является оперативная локализация и герметизация различных повреждений, а также восстановление водонепроницаемого защитного покрытия.

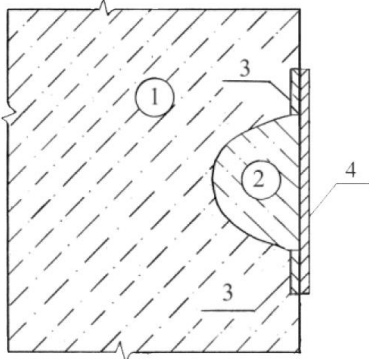
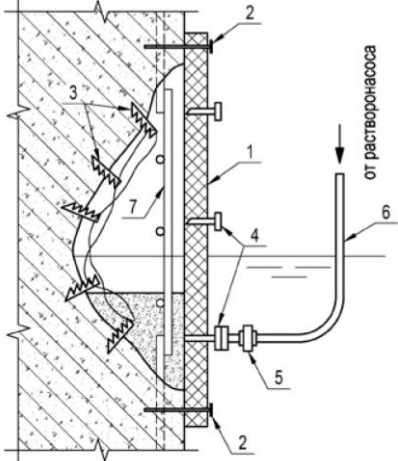
Для эффективного восстановления несущей способности гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в зоне постоянного воздействия воды, применяется технология инъектирования. Данная технология предназначена для восстановления проектных значений бетонных поверхностей: устранение прямой фильтрации, влаги и активных протечек, гидроизоляция холодных швов, устройство горизонтальной отсечной гидроизоляции, устройство противофильтрационных завес и т. п. Главным ее преимуществом является возможность изменять эксплуатационно-технические характеристики бетонной поверхности, изменяя физико-химические показатели внутренней структуры конструкции. При выборе материала необходимо учитывать значительное для инъектирования количество технических и эксплуатационных требований для каждого конкретного объекта. При правильно выбранных для инъектирования полимерных материалах и технологиях их нанесения для бетонных поверхностей каналов они способны значительно увеличить долговечность конструкции, а также снизить затраты на их ремонт [10].

⁵Ремонтный материал POLYDUBER, для восстановления, ремонта и защиты бетонных конструкций [Электронный ресурс]. URL: <https://polyduber.tb.ru/> (дата обращения 23.07.2025)

На основании выполненного анализа разработок по ремонту и восстановлению бетонных элементов гидротехнических сооружений составлена таблица 3 с некоторыми техническими решениями, направленными на восстановление целостности и продления срока службы ГТС.

Таблица 3 – Технические решения для ремонта бетонных элементов гидротехнических сооружений

Table 3 – Technical solutions for repairing concrete elements of hydraulic structures

Автор разработки и ее описание	Конструктивная схема
1	2
Д. С. Дубяго предложено решение для ремонта и ухода за бетонными и железобетонными конструктивными элементами гидротехнических сооружений по методу «приклеивание полиэтиленовой пленки» [11]. На схеме приведена технология, направленная на обеспечение безвлажного ухода за гидротехническим бетоном (набор прочности). Сущность этого метода заключается в приклеивании пленки к поверхности уложенного бетона (ремонтимруемого участка) и к прилегающей бетонной поверхности. После набора прочности, при котором деструктивное воздействие влаготеря не оказывает влияния на свойства бетона, пленка удаляется. Такое конструктивное решение нашло свое применение на гидромелиоративных объектах Республики Беларусь[12]	 1 – бетон конструкции; 2 – уложенный бетон; 3 – поверхность приклеивания; 4 – полиэтиленовая пленка
В. М. Давиденко предложены решения для ремонта поверхностных повреждений бетона методом «пластырной» цементации [13, 14]. Данный метод использует нагнетание цементно-песчаных растворов в полость, ограниченную опалубкой. Суть его заключается в том, что предварительно демонтируется слабый бетон, выполняется подготовка основания, устанавливается и плотно прижимается щит опалубки, монтируется насос, который подает бетонную смесь. Такой способ применяется для условий бетонирования конструкций под водой и в зоне переменного уровня	 1 – опалубка; 2 – анкер; 3 – заершеннные штыри; 4 – штуцер; 5 – кран; 6 – шланг; 7 – восстановленная арматура

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

1	2
Г. В. Охапкиным [15] рассмотрена технология ремонта конструктивных и неконструктивных трещин в бетоне гидротехнических сооружений различного назначения и конструктивного исполнения. Технология [15] заключается в подготовке повреждения (трещины) и непосредственному производству ремонтных работ (инъектированию). Автором исследованы 2 варианта трещин: с проявлением и без проявления фильтрации, предложены типовые технические решения по ремонту трещин, в том числе с признаками коррозии бетона и арматуры. Разработан метод выбора наиболее приемлемых технических решений по ремонту трещин в гидротехническом бетоне	Без проявления фильтрации 1 – инъекционный материал в конструктивной (неконструктивной) трещине; 2 – ремонтный материал С проявлением фильтрации 1 – инъекционный материал в конструктивной (неконструктивной) трещине (1-й этап); 2 – инъекционный материал (2-й этап); 3 – ремонтный материал (гидропломба)
И. Л. Опанасюк рассмотрены работы по восстановлению эксплуатационных качеств бетонных конструктивных элементов, которые включают в себя подготовительный этап и этап укладки бетонной смеси. Рассмотрено бетонирование конструкции через технологические отверстия. Конструктивно-технологическое решение осуществляется следующим образом: бетонная смесь подается через технологические отверстия в перекрытии и при помощи распределительной воронки укладывается в обойму усиления [16]	1 – усиливаемая колонна; 2 – железобетонная обойма усиления; 3 – технологические отверстия; 4 – распределительная воронка; 5 – бетонная смесь

Результаты и обсуждение. Бетонные гидротехнические сооружения подвержены различным типам повреждений, снижающих их долговечность и безопасность. На рисунке 1 приведено среднестатистическое распределение повреждений гидротехнических сооружений на основе многолетних исследований. Фактическое распределение может варьироваться в зависимости от условий эксплуатации и качества технического обслуживания.

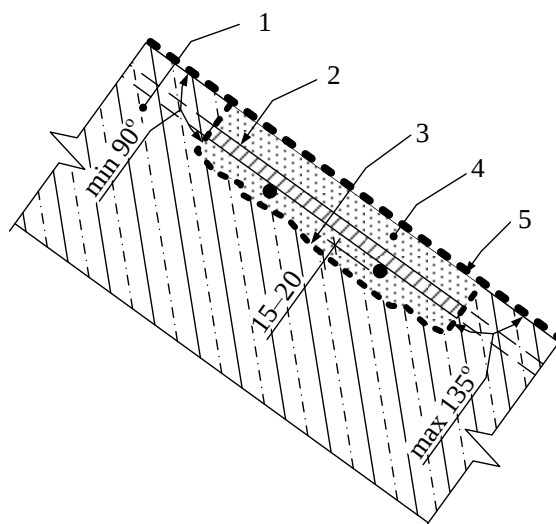


Рисунок 1 – Среднестатистические показатели повреждений гидротехнических сооружений

Figure 1 – Average damage rates for hydraulic structures

В большинстве случаев повреждения и дефекты гидротехнических сооружений располагаются в зоне стыков. Поэтому при работах по восстановлению технологическим швам необходимо уделять особое внимание. В случае нарушения гидроизоляции в зоне шва и проникновения водной среды профиль продолжает «впитывать» воду, при этом еще больше уплотняя межшовное пространство. Перед началом ремонта железобетонных конструкций следует выполнить детальное обследование всей кон-

струкции с фиксацией выявленных повреждений. После обнаружения дефектов и повреждений на обследуемой конструкции подбираются ремонтные составы, которые существенно повышают несущую способность. Система ремонта и защита бетона с использованием ремонтных составов представлена на рисунке 2.



- 1 – защитный слой из бетона; 2 – слой покрытия; 3 – праймирующий слой;
4 – ремонтный состав; 5 – выравнивающий слой
1 – concrete protective layer; 2 – coating layer; 3 – priming layer;
4 – repair compound; 5 – leveling layer

Рисунок 2 – Схема ремонта и защиты конструкции
Figure 2 – Structure repair and protection diagram

Ремонт поврежденного участка бетонной конструкции и нанесение защитного покрытия выполняется после его предварительной подготовки, которая в зависимости от степени и количества повреждений подразделяется на следующие этапы:

- механическая обработка места повреждения (вручную или при помощи специально оборудования);
- пескоструйная сухая и мокрая обработка;
- дробеструйная обработка;
- промывка повреждения водой и его просушка;
- химическая обработка ремонтируемой поверхности бетона и арматуры.

Для лучшей адгезии ремонтного состава на участке повреждения его поверхность подготавливается соответствующим образом – зона ремонта должна быть шероховатой и чистой. При локальном ремонте поврежденного элемента его кромки оконтуривают на необходимую глубину, чтобы обеспечить шероховатость ремонтируемой поверхности для лучшего сцепления ремонтного состава. Перед нанесением ремонтных составов основание необходимо предварительно увлажнить, сильно впитывающее влагу основание необходимо увлажнить несколько раз. Подготовленная поверхность для нанесения ремонтного состава должна быть влажной, но на ее поверхности не допускается образование водяной пленки.

Для продления срока службы ремонтируемой конструкции необходима антикоррозионная защита арматуры, которая выполняется после очистки от бетона по всей длине. Стальная арматура в железобетонных конструкциях очищается струйным способом при помощи специального оборудования. В случае ее значительного коррозионного повреждения арматуру необходимо заменить. После подготовки арматуры по всей ее поверхности наносят в несколько слоев грунтовочный антикоррозионный материал.

Приготовление ремонтных составов осуществляется при температуре не менее +5 °С путем тщательного перемешивания сухой ремонтной смеси с водой. Для ее приготовления используются бетоносмесители гравитационного или принудительного типов объемом не менее 0,1 м³, ручной миксер, низкооборотную дрель. Подготовка ремонтной смеси осуществляется до образования однородной консистенции без крупных и мелких включений.

После приготовления ремонтный состав наносится на заранее подготовленную поверхность, заполняя всю площадь ремонтируемого пространства. Его нанесение выполняется вручную или при помощи специального механизированного оборудования смесительно-насосных агрегатов (набрызгом).

На небольшие повреждения смесь наносится без применения опалубки, ввиду этого повреждение плотно заполняется ремонтным составом без пустот⁶.

Также для ремонта крупных повреждений и дефектов бетона применяется технология с использованием опалубки и дополнительного армирования⁷.

Для выполнения ремонта и устранения дефектов бетона участок заранее подготавливается, его опиляют по контуру повреждения при помощи строительного инструмента на глубину не менее 10 мм, рисунок 3.

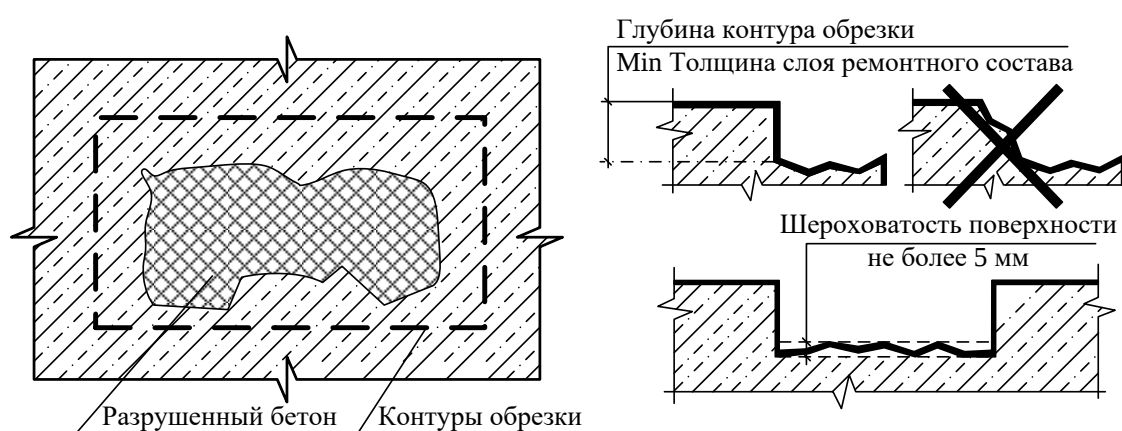


Рисунок 3 – Схема подготовки поверхности бетона

Figure 3 – Concrete surface preparation diagram

При помощи строительного инструмента производится удаление ослабленного, рыхлого и потрескавшегося бетона с обеспечением доступа к арматуре для ее последующей антикоррозионной защиты. По всей площади повреждения бетона ей придают шероховатость для лучшего сцепления (адгезии) ремонтного состава. Арматура очищается от ржавчины при помощи пескоструйной обработки или щетками-насадками на механизированном оборудовании, которое применяют на всей площади поверхности

⁶Каталог ремонтных составов и технологий производства работ по ремонту бетонных облицовок каналов [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosniipm.ru/DOC/2022/database/Katalog_tech_remonta.pdf

⁷Технологический регламент по восстановлению эксплуатационных свойств железобетонных конструкций методом внешнего армирования [Электронный ресурс]. URL: <https://xn----clnqbcjiag1aeovmhkfpjo7e.xn--p1ai/wp-content/uploads/tehnologicheskij-reglament-fibarm-ot-ooo-csmt-.pdf>

арматуры. Перед нанесением ремонтной смеси подготовленный участок должен быть очищен от бетона, пыли, грязи и предварительно увлажнен (для предотвращения отбора гидратационной влаги из ремонтного состава). При отсутствии арматуры на ремонтируемом участке или при необходимости утолщения защитного слоя бетона участок дополнительно армируется сеткой. Сетка закрепляется по всей площади конструкции с использованием анкеров.

Устанавливаемая опалубка должна соответствовать определенным требованиям. Ее поверхность, обращенную к бетону, выбирают с учетом фактуры бетонной поверхности ремонтируемой конструкции. Конструкция такой опалубки должна обеспечивать надлежащее качество поверхности бетона, а ее поверхность, соприкасающаяся с лицевыми поверхностями, должна быть ровной (рисунок 4).

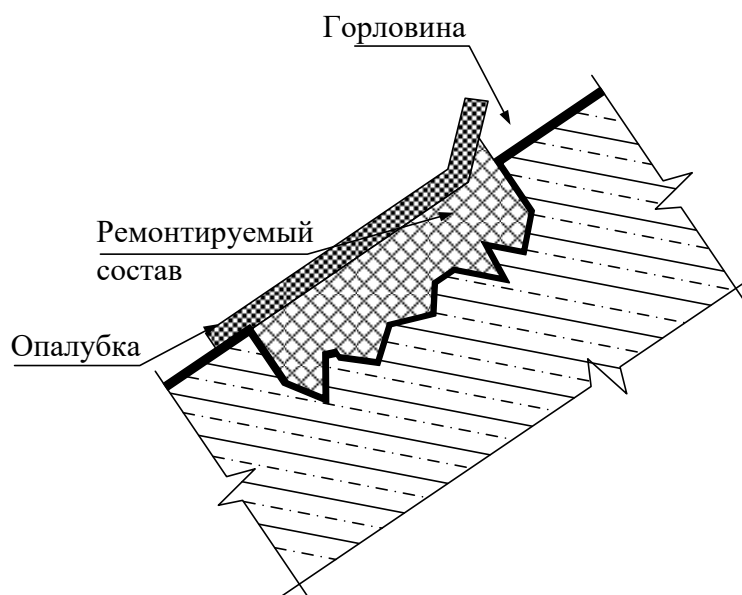


Рисунок 4 – Схема установки опалубки при реконструкции
Figure 4 – Formwork installation diagram for reconstruction

Поверхность опалубки, примыкающая к бетону, должна плотно прилегать к его поверхности для обеспечения герметичности при заполнении ее ремонтным составом. При устройстве и креплении учитывается внутреннее давление бетона, а также давление при подаче ремонтного состава.

Виды опалубки, применяемые при ремонте бетонных конструкций:

- дощатая двухсторонняя или односторонняя;
- дощатая передвижная, движущаяся по направляющим.

Заполнение опалубки ремонтным составом производится под давлением при помощи пневмобетононасосов. Контроль степени заполнения пространства производится по выпускным трубкам, установленным на высоких отметках заполняемого пространства⁸. Ремонтный состав подается непрерывно до полного заполнения повреждения. При выборе ремонтных материалов заблаговременно определены условия эксплуатации объекта для выявления требований к физико-механическим характеристикам материалов. На основании требований объекта или конструкции к ремонтным составам на выбор ремонтного материала определяются следующие характеристики: совместимость ремонтного состава и материала ремонтируемой конструкции; несущая способность сооружения; глубина разрушений; условия эксплуатации (температурный режим, влажность и агрессивность среды, динамические воздействия); расположение конструкции.

Наряду с этим, выбор материала определяется в зависимости от вида проводимого ремонта – текущего (не требующего восстановления несущей способности конструкции) или капитального (непосредственно для восстановления несущей способности). Выбор ремонтных материалов осуществляется на основании принятого проектного решения с соответствующим обоснованием применяемых конструкций и материалов.

Так, например, при традиционном подходе к ремонту бетонных повреждений элементов гидротехнических сооружений используется последовательный алгоритм выполнения, который приведен на рисунке 5.

⁸Технологический регламент по восстановлению эксплуатационных свойств железобетонных конструкций методом внешнего армирования [Электронный ресурс]. URL: <https://xn----clnqabcjag1aeovmhkfpjo7e.xn--p1ai/wp-content/uploads/tehnologicheskij-reglament-fibarm-ot-ooo-csmt-.pdf>

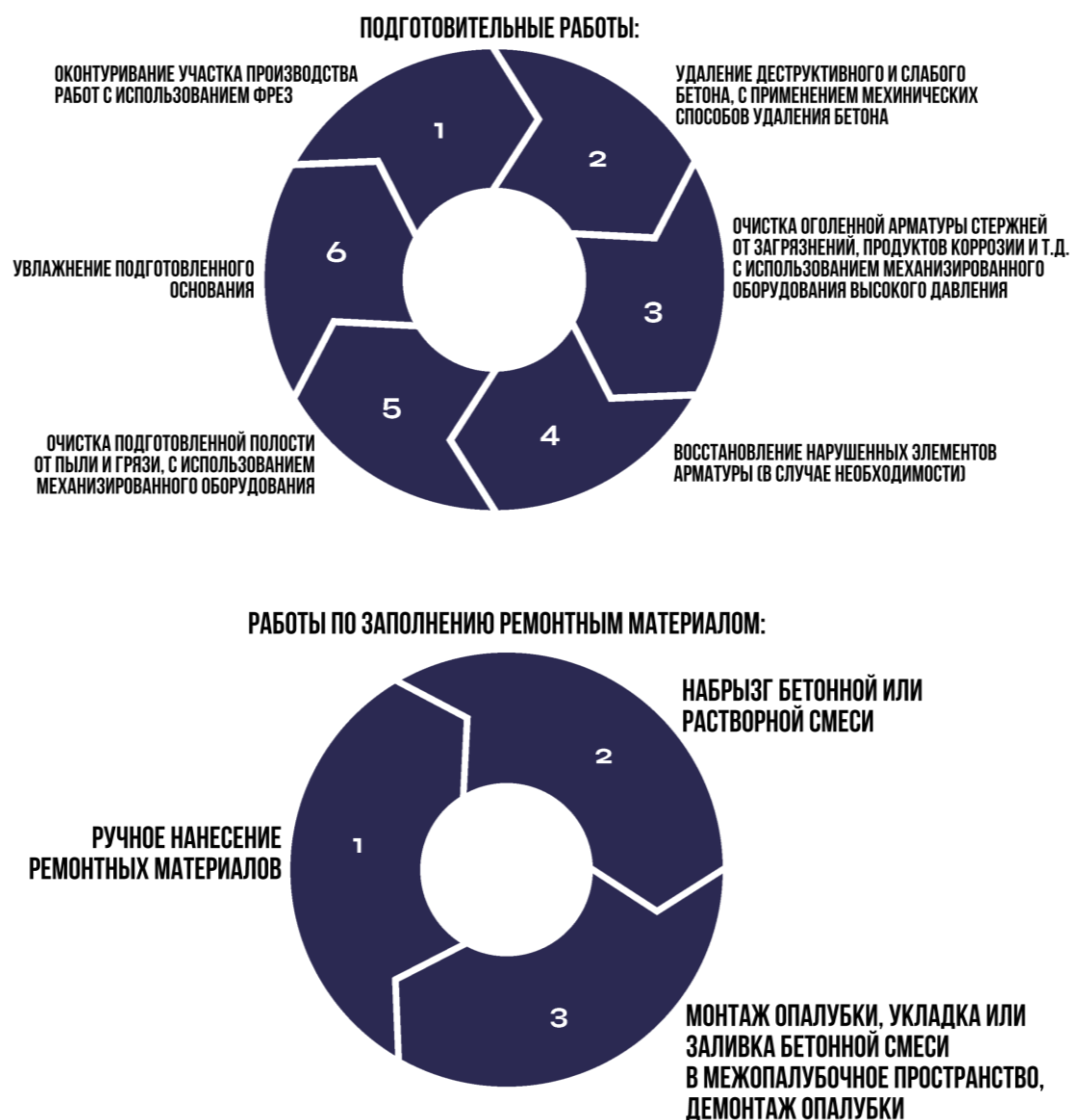
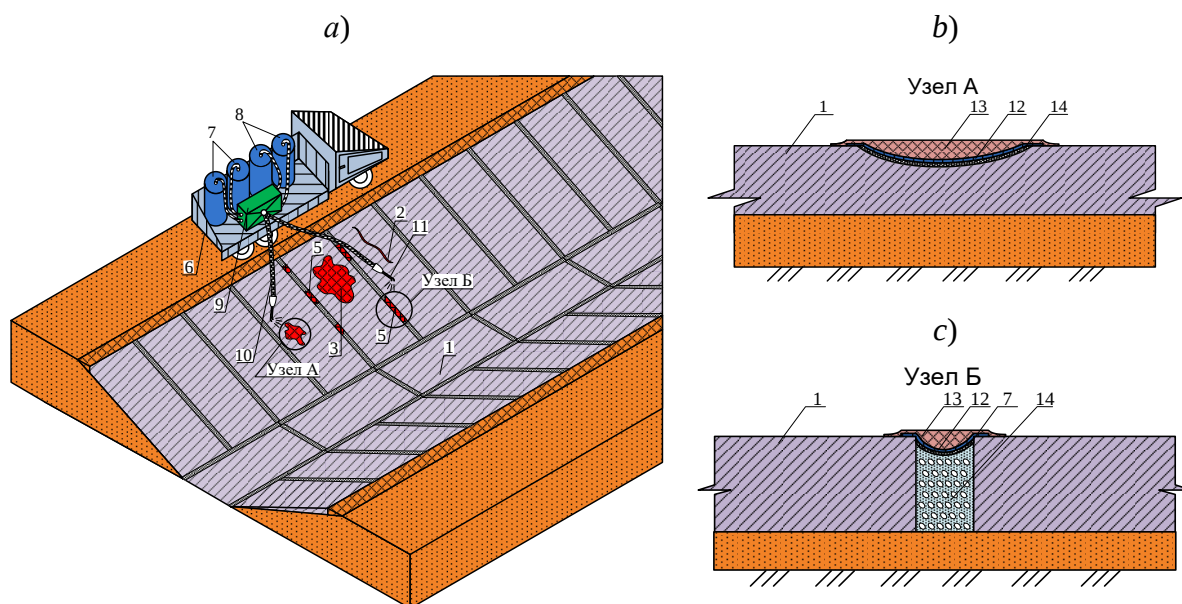


Рисунок 5 – Основные этапы производства ремонтных работ с использованием традиционных технических решений

Figure 5 – Key stages of repair work using traditional technical solutions

Эффективным способ ремонта повреждений бетонных элементов гидротехнических сооружений является применение жидких полимеров. Такие материалы представляют собой модифицированную битумно-латексную эмульсию, поставляются в виде двух компонентов и состоят из битума и модификатора, который в значительной степени увеличивает прочностные и эластичные свойства материала. Разработанный способ ремонта бетонной облицовки с применением таких технологий приведен на рисунке 6.



a – план-схема размещения оборудования; *b* – ремонт поверхностных повреждений;
c – ремонт деформационных швов и трещин

a – equipment layout plan; *b* – surface damage repair; *c* – expansion joint and crack repair
1 – бетонная облицовка; 2 – повреждение в виде трещины; 3 – локальное повреждение в бетонной облицовке; 4 – песчано-гравийный наполнитель; 5 – повреждение в деформационном шве; 6 – механизированное оборудование; 7 – емкость с компонентом А (реагентом); 8 – емкость с компонентом Б; 9 – компрессорная установка; 10 – гибкие шланги; 11 – распылитель двухканальный; 12 – геотекстиль; 13 – финишное покрытие; 14 – заделка повреждений бетонных облицовок
1 – concrete lining; 2 – crack damage; 3 – localized damage in concrete lining; 4 – sand and gravel filler; 5 – expansion joint damage; 6 – mechanized equipment; 7 – component A (reagent) tank; 8 – component B tank; 9 – compressor unit; 10 – flexible hoses; 11 – dual-channel sprayer; 12 – geotextile; 13 – finishing coating; 14 – concrete linings sealing damage

Рисунок 6 – Способ ремонта бетонной облицовки жидким полимерным материалом⁹

Figure 6 – Method for repairing concrete linings with liquid polymer material⁹

Процесс ремонта облицовки выполняется в четыре этапа и включает: очистку поверхности (подготовку); праймирование с использованием механизированного оборудования (компрессорной установки); напыление на поврежденную поверхность бетона тонкого слоя компонента А, укладку

⁹Пат. 2732588 Российская федерация, МПК E02B 13/00, E02B 3/16 Способ ремонта бетонных облицовок длительно работающих каналов / С. М. Васильев, Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз; заявитель и патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. № 2019134272; заявл. 24.10.2019; опубл. 21.09.2020, Бюл. № 27. 9 с. ил.

полотнища нетканого геотекстиля; устройство финишного покрытия с использованием компонента Б. Преимуществом данного решения является возможность ремонта различных повреждений бетонных элементов, повышение надежности, противofильтрационной эффективности и продление срока службы, ликвидация зон фильтрации и снижение шероховатости.

Выводы. Зарубежный и отечественный опыт показал, что применение инновационных материалов и технологий ремонта бетонных ГТС значительно повышает долговечность и надежность их конструкций (на 20–50 %), а также снижаются эксплуатационные расходы (на 25–40 %). Использование композитных материалов, таких, как стеклопластиковая арматура (GFRP) и полимерные покрытия, позволяет снизить фильтрацию воды, предотвратить коррозию и уменьшить разрушение бетона. Методы инъектирования, торкретирования и внешнего армирования доказали свою эффективность в восстановлении несущей способности ГТС, особенно в зонах переменного уровня воды, подверженных циклическому замораживанию – оттаиванию. Так, по данным ПАО «РусГидро», применение модифицированных бетонов с различными добавками повысило морозостойкость конструкций ГТС на 35 %.

Анализ технического состояния гидросооружений требует сочетания современных методов неразрушающего контроля, цифрового моделирования и мониторинга. Разработанные алгоритмы оценки повреждений позволяют оптимизировать выбор ремонтных материалов и технологий, минимизируя затраты и сроки восстановления. Особое внимание следует уделять герметизации деформационных швов и трещин, что способствует увеличению срока службы конструкции от 10 до 30 лет, а также снижению затрат на текущий ремонт до 40–60 %.

Цифровая трансформация процессов ремонта, включая создание баз данных типовых решений и алгоритмов выбора материалов, открывает новые возможности для повышения качества и скорости восстановительных

работ. Применение ремонтных составов холодного отверждения и инъекционных полимеров позволяет оперативно устранять дефекты без длительного вывода сооружения из эксплуатации. В ближайшей перспективе исследования должны быть направлены на разработку экологически устойчивых, экономически выгодных технологий и интеграцию систем автоматизированного мониторинга для прогнозирования остаточного ресурса конструкций ГТС.

Таким образом, сочетание передовых материалов, технологий и цифровых решений обеспечивает не только восстановление, но и значительное повышение эксплуатационной надежности бетонных ГТС.

Список источников

1. Абдразаков, Ф. К. Перспективные подходы к ремонту и усовершенствованию облицовки оросительных каналов с применением композитов // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы XIV Нац. конф. с междунар. участием, г. Саратов, 25–26 апр. 2024 г. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2024. С. 271–275. EDN PPJOOM.
2. Tian J. L., Niu J. G. The Performance Study of the Open Channel Concrete in Cold Area // Advanced Materials Research, 2012. Vol. 535–537. P. 1661–1664. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537
3. Experimental Study of Open Channel Model of Glass Fiber Reinforced Polymer and Its Flowing Characteristics / H. Suryadarma, N. Salam, M. Pallu, M. Farouk // International Journal of Engineering, 2024. Vol. 37. P. 692–710. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.04A.10. EDN: BWJRLO.
4. Комплексный мониторинг технического состояния конечного водоспуска Невинномысского канала, базирующийся на оценке параметров надежности / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 264–280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280. EDN: ZELKMQ.
5. Мотько Е. В. Разработка этапов диагностики по обеспечению надежности и продлению срока службы каналов // Вестник науки. 2023. Т. 4, № 7(64). С. 286–291.
6. Дубяго Д. С., Новиков А. Е., Григоров С. М. Дефекты бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений мелиоративных систем Республики Беларусь // Мелиорация и водное хозяйство, 2023. № 2. С. 36–40. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-36-40. EDN: ZZOELW.
7. Охапкин Г. В. Цифровая трансформация выбора технических решений по восстановлению и ремонту дефектов и повреждений бетонных и железобетонных гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2024. Т. 312. С. 69–83. EDN: ZJGZEN.
8. Бибина О. Е., Охапкин Г. В. Обзор технических решений по ремонту трещин в бетоне массивных гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2023. Т. 308. С. 103–115. EDN: KQUTFB.
9. Охапкин Г. В. Подходы к восстановлению объемной структуры бетона гидро-

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 164–186.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 164–186.

технических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2020. Т. 296. С. 13–21. EDN: KKWFSR.

10. Гарбуз А. Ю., Баев О. А. Ремонт бетонных облицовок каналов полимерными композициями // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях: сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс, 25–27 мая 2016 г. Энгельс, 2016. С. 169–174.

11. Дубяго Д. С. Уход за бетоном с использованием пленки при ремонте и восстановлении бетонных и железобетонных конструктивных // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Прикладные науки. Строительство. 2007. № 6. С. 82–91.

12. Виды и структура ремонтных работ гидромелиоративных систем Республики Беларусь / Н. Н. Дубенок, А. Е. Новиков, Д. С. Дубяго, М. В. Климахина // Орошаемое земледелие. 2022. № 4(39). С. 13–16. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-4-12. EDN: BYVYEF.

13. 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. EDN: APSTIW.

14. Давиденко В. М. Теоретические вопросы ремонта бетонных сооружений, находящихся под водой // Гидротехника. 2009. № 1. С. 39–41. EDN: OEERHD.

15. Бибина О. Е., Охапкин Г. В. О некоторых подходах к ремонту трещин в бетоне гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2023. № 6. С. 18–24. EDN: ZSSDYR.

16. Опанасюк И. Л., Данилов С. В. Бетонные работы при восстановлении эксплуатационных качеств железобетонных колонн // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 3(36). С. 96–103. DOI: 10.53078/20778481_2012_3_96. EDN: PWAUWT.

References

1. Abdrazakov F.K., 2024. *Perspektivnye podkhody k remontu i usovershenstvovaniyu oblitsovki orositel'nykh kanalov s primeneniem kompozitov* [Promising approaches to repairing and improving the lining of irrigation canals using composites]. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya: materialy XIV Nats. konferentsii s mezhdunar. uchastiem* [Modern Problems and Prospects for the Development of Construction, Heat and Gas and Energy Supply: Proceed. of the XIV National Conference with International Participation]. Saratov, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov], pp. 271–275, EDN PPJOOM. (In Russian).

2. Tian J.L., Niu J.G., 2012. The Performance Study of the Open Channel Concrete in Cold Area. *Advanced Materials Research*, vol. 535–537, pp. 1661–1664, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.

3. Suryadarma H., Salam N., Pallu M., Farouk M., 2024. Experimental Study of Open Channel Model of Glass Fiber Reinforced Polymer and Its Flowing Characteristics. *International Journal of Engineering*, vol. 37, pp. 692–710, DOI: 10.5829/IJE.2024.37.04A.10, EDN: BWJRLQ.

4. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Rudenko A.A., 2023. *Kompleksnyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya kontsevego vodospuska Nevinnomysskogo kanala, baziruyushchiysya na otsenke parametrov nadezhnosti* [Comprehensive monitoring of the technical condition of the end spillway of the Nevinnomyssk Canal based on the assessment of reliability parameters]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 2, pp. 264–280. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-264-280, EDN: ZELKMQ. (In Russian).

5. Motko E.V., 2023. *Razrabotka etapov diagnostiki po obespecheniyu nadezhnosti i prodleniyu sroka sluzhby kanalov* [Development of diagnostic stages to ensure reliability and

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 164–186.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 164–186.

extend the service life of canals]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], vol. 4, no. 7(64), pp. 286-291. (In Russian).

6. Dubyago D.S., Novikov A.E., Grigorov S.M., 2023. *Defekty betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnykh sistem Respubliki Belarus* [Defects of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures of land reclamation systems of the Republic of Belarus]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 36-40, DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-36-40, EDN: ZZOELW. (In Russian).

7. Okhapkin G.V., 2024. *Tsifrovaya transformatsiya vybora tekhnicheskikh resheniy po vosstanovleniyu i remontu defektov i povrezhdeniy betonnykh i zhelezobetonnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Digital transformation for the technical solutions" choice for restoration and repair of defects and damages of concrete and reinforced concrete hydro-technical facilities]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceed. of the VNIIG named after B.E. Vedeneev], vol. 312, pp. 69-83, EDN: ZJGZEH. (In Russian).

8. Bibina O.E., Okhapkin G.V., 2023. *Obzor tekhnicheskikh resheniy po remontu treshchin v betone massivnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Overview of technical solutions for cracks' restoration in the massive hydraulic structure' concrete]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceed. of the VNIIG named after B.E. Vedeneev], vol. 308, pp. 103-115, EDN: KQUTFB. (In Russian).

9. Okhapkin G.V., 2020. *Podkhody k vosstanovleniyu ob"emnoy struktury betona gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Approaches to restoring the volumetric structure of concrete in hydraulic structures]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceed. of the VNIIG named after B.E. Vedeneev], vol. 296, pp. 13-21, EDN: KKWFSR. (In Russian).

10. Garbuz A.Yu., Baev O.A., 2016. *Remont betonnykh oblitsovok kanalov polimernymi kompozitsiyami* [The repair of concrete canal linings with polymer composites]. *Problemy i perspektivy razvitiya melioratsii v sovremennykh usloviyakh: sb. nauch. trudov po mater. nauch.-prakt. konf.* [Problems and Prospects for the Development of Land Reclamation under Current Conditions: Collection of Scientific Papers of the Proceed. of the Scientific and Practical Conference]. Federal State Budgetary Scientific Institution "VolzhNIIGiM", Engels, pp. 169-174. (In Russian).

11. Dubyago D.S., 2007. *Ukhod za betonom s ispol'zovaniem plenki pri remonte i vosstanovlenii betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktivnykh* [Concrete curing using film during repairing and restoration of concrete and reinforced concrete structures]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Prikladnye nauki. Stroitel'stvo* [Bulletin of Polotsk State University. Series F: Applied Sciences. Construction], no. 6, pp. 82-91. (In Russian).

12. Dubyago N.N., Novikov A.E., Dubyago D.S., Klimakhina M.V., 2022. *Vidy i struktura remontnykh rabot gidromeliorativnykh sistem Respubliki Belarus'* [Types and structure of repair work of hydro-reclamation systems of the Republic of Belarus]. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture], no. 4(39), pp. 13-16, DOI: 10.35809/2618-8279-2022-4-12, EDN: BYVYEF. (In Russian).

13. 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 deep concrete cracks with exposure of reinforcement on reinforced structures of hydraulic engineering installations]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 3(64), pp. 85-88, EDN: APSTIW. (In Russian).

14. Davidenko V.M., 2009. *Teoreticheskie voprosy remonta betonnykh sooruzheniy, nakhodyashchikhsya pod vodoy* [Theoretical issues of repairing concrete structures located under water]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering], no. 1, pp. 39-41, EDN: OEERHD. (In Russian).

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 164–186.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 164–186.

15. Bibina O.E., Okhapkin G.V., 2023. *O nekotorykh podkhodakh k remontu treshchin v betone gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [On some approaches to repairing cracks in concrete of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 6, pp. 18-24, EDN: ZSSDYR. (In Russian).

16. Opanasyuk I.L., Danilov S.V., 2012. *Betonnye raboty pri vosstanovlenii ekspluatatsionnykh kachestv zhelezobetonnykh kolonn* [Concrete work in restoring the performance of reinforced-concrete columns in the restoration of operational qualities of reinforced concrete columns]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulet. of Belarusian-Russian University], no. 3(36), pp. 96-103, DOI: 10.53078/20778481_2012_3_96, EDN: PWAUWT. (In Russian).

Информация об авторах

А. Ю. Гарбуз – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, A.Y.Garbuz@yandex.ru, AuthorID: 740740, ORCID ID: 0000-0003-1503-7300;
О. А. Баев – ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, доцент, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, Oleg-Baev1@yandex.ru, AuthorID: 699695, ORCID ID: 0000-0003-0142-4270.

Information about the authors

A. Yu. Garbuz – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, A.Y.Garbuz@yandex.ru, AuthorID: 740740, ORCID ID: 0000-0003-1503-7300;
O. A. Baev – Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, Oleg-Baev1@ya.ru, AuthorID: 699695, ORCID ID: 0000-0003-0142-4270.

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 29.09.2025; одобрена после рецензирования 22.10.2025; принята к публикации 05.11.2025.

The article was submitted 29.09.2025; approved after reviewing 22.10.2025; accepted for publication 05.11.2025.