

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 626.8

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-43-66

Натурные сравнительные исследования эффективности современных технологий и материалов для гидроизоляции каналов оросительных систем

Иван Александрович Коваленко

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, Волгоград, Российская Федерация, kovalenko-i@vfanc.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3147-6613>

Аннотация. Цель: натурное сравнение четырех технологий и материалов в сфере гидроизоляции оросительных каналов и выбор оптимального решения по совокупности гидротехнических, эксплуатационных и экономических показателей в условиях повышенной минерализации воды и интенсивных климатических воздействий, характерных для Южного федерального округа. **Материалы и методы.** Объектами исследований выступили шесть оросительных систем с суммарной протяженностью каналов 45,5 км. На опытных участках с идентичными гидравлическими параметрами последовательно применены цементно-песчаный раствор (Т1), полимерцементная композиция (Т2), битумно-полимерная эмульсия (Т3) и модифицированный фибробетон с диоксидом кремния и водно-щелочным раствором силикатов натрия (Т4). Оценка эффективности выполнена по водонепроницаемости, измеряемой прибором «АГАМА-2РМ», по фильтрационным потерям, вычисляемым с применением уточненной формулы с учетом гидравлического градиента, по адгезии, регистрируемой методом нормального отрыва, по морозостойкости и сульфатостойкости, а также по стоимости жизненного цикла за расчетный период 50 лет. Статистическая обработка выполнена с применением критерия Стьюдента и однофакторного дисперсионного анализа. **Результаты.** Модифицированный фибробетон обеспечил снижение фильтрационных потерь на 85–90 % ($p < 0,01$), марки по водонепроницаемости W12–W14, адгезию 1,98–2,35 МПа и расчетный межремонтный период 40–50 лет. При реальной ставке дисконтирования 9,4 % годовых стоимость жизненного цикла варианта Т4 составила 41,2 млн руб./км против 59,3 млн руб. при традиционном цементно-песчаном ремонте, что соответствует снижению в 1,44 раза, чистому дисконтированному эффекту 18,1 млн руб./км за расчетный период и среднегодовому эффекту 1,72 млн руб./км. Экономия воды составила 75000 куб. м в год на 1 км канала. **Выводы.** Модифицированный фибробетон рекомендуется для гидроизоляции оросительных каналов при минерализации воды свыше 2,0 г/л и концентрации сульфатов выше 1000 мг/л, преимущество устойчиво во всем диапазоне исследованных ставок дисконтирования.

Ключевые слова: оросительные каналы, гидроизоляция, фильтрационные потери, водонепроницаемость, полимерцементные композиции, фибробетон, мелиоративные системы

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания 125020401361-1.

Для цитирования: Коваленко И. А. Натурные сравнительные исследования эффективности современных технологий и материалов для гидроизоляции каналов оросительных систем // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 43–66. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-43-66>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Field comparative studies of the efficiency of modern technologies and materials for irrigation canals waterproofing

Ivan A. Kovalenko

Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russian Federation, kovalenko-i@vfanc.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3147-6613>

Abstract. Purpose: to conduct a field comparison of four technologies and materials for waterproofing irrigation canals and to select the optimal solution based on a combination of hydraulic, operational, and economic indicators under high water mineralization and intense climatic impacts typical for the Southern Federal District. **Materials and methods.** The objects of the study were six irrigation systems with a total canal length of 45.5 km. Cement-sand mortar (T1), polymer-cement composite (T2), bitumen-polymer emulsion (T3), and modified fiber-reinforced concrete with silicon dioxide and an aqueous alkaline solution of sodium silicates (T4) were successively used on test sites with identical hydraulic parameters. The efficiency was assessed on the basis of water impermeability measured by the AGAMA-2RM device, seepage losses calculated using a refined formula taking into account the hydraulic gradient, adhesion recorded by the normal pull-off method, frost and sulfate resistance, and life cycle cost over a 50-year design period. Statistical processing was performed using the Student's t-test and one-way ANOVA test. **Results.** Modified fiber-reinforced concrete ensured a reduction in seepage losses by 85–90 % ($p < 0.01$), water resistance grades W12–W14, adhesion of 1.98–2.35 MPa, and an estimated period between repairs of 40–50 years. At a real discount rate of 9.4 % per annum, the life cycle cost of T4 option was 41.2 million rubles/km versus 59.3 million rubles/km with traditional cement-sand repairs, which corresponds to a 1.44-fold reduction, a net discounted effect of RUB 18.1 million/km for the calculation period, and an average annual effect 1.72 million rubles/km. Water savings amounted to 75,000 cubic meters per year per 1 km of canal. **Conclusions.** Modified fiber concrete is recommended for waterproofing irrigation canals with water mineralization above 2.0 g/l and sulfate concentrations above 1000 mg/l. This advantage is consistent across the entire range of discount rates studied.

Keywords: irrigation canals, waterproofing, seepage loss, water impermeability, polymer-cement composites, fiber concrete, reclamation systems

Funding source: the study was conducted within the framework of State Assignment 125020401361-1.

For citation: Kovalenko I. A. Field comparative studies of the efficiency of modern technologies and materials for irrigation canals waterproofing. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):43–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-43-66>.

Введение. Оросительные системы (ОС) юга европейской части России в основном введены в эксплуатацию в 1950–1970-х гг., и к настоящему времени износ противофильтрационных облицовок каналов стал одним из главных факторов, ограничивающих водообеспеченность орошаемых земель.

Потери воды на фильтрацию достигают 40–70 % объема водозабора, вследствие чего коэффициент полезного действия систем снижается до 0,50–0,66 при нормативном значении 0,90–0,93 [1, 2]. Восстановление облицовок конкурирует за ограниченный объем капиталовложений с другими видами ремонтно-эксплуатационных работ [3, 4], поэтому выбор технологии должен опираться на количественно сопоставимые натурные данные, полученные в одинаковых условиях. Отсутствие таких данных для условий сульфатно-хлоридной агрессии и определяет актуальность настоящего исследования.

По данным мониторинга ФГБУ «Управление «Волгоградмелиоводхоз», ежегодные фильтрационные потери превышают 2,6 км³ – свыше половины объема воды, подаваемой на орошение. Для Южного федерального округа (ЮФО) ситуация особенно острая, минерализация воды в магистральных и распределительных каналах держится в диапазоне 1,5–3,2 г/л, концентрация сульфат-ионов превышает 1000 мг/л, а зимой фиксируется до 85–110 циклов замораживания-оттаивания. Под действием этих факторов бетонные облицовки деградируют значительно быстрее, чем в среднем по стране [1, 2].

Основные механизмы разрушения – сульфатная коррозия с образованием этtringита и гипса, гидроабразивный износ до 3–6 мм/год, карбонизация цементного камня и температурное трещинообразование [3]. Стандартный цементно-песчаный раствор без модификации выдерживает 7–10 лет, после чего требует полной замены, при действующих тарифах на воду и дефиците капиталовложений это экономически неприемлемо.

Полимерные и полимерцементные материалы в лабораторных условиях показывают заметно лучшие результаты [4, 5], однако их поведение при одновременном воздействии агрессивной химической среды и динамических нагрузок изучено фрагментарно, а оценка эффективности противofiltrационной защиты сооружений оросительных систем выполнялась преимущественно расчетными методами [6]. Текстов, которые содержали бы результаты комплексных натурных сравнений на однотипных участках

с идентичными гидравлическими режимами, опубликовано не было, поэтому выбор технологии для конкретного объекта по-прежнему осуществляется без надежного обоснования.

Отдельные аспекты проблемы рассматривались в работах Ю. М. Косиченко и О. А. Баева [7, 8], В. Ф. Талалаевой [6], М. А. Бандурина и В. А. Волосухина [3], а также А. В. Ищенко [9], вопросы применения полимерных композиций при ремонте каналов освещены А. Ю. Гарбузом и В. Ф. Талалаевой [4, 5]. Тем не менее все они опираются либо на лабораторные испытания, либо на точечные опытно-промышленные работы на магистральных каналах, сравнения четырех технологий в условиях высокой минерализации и экстремальных климатических циклов, характерных для ЮФО, до настоящего времени не проводилось.

Цель исследования – натурное сравнение четырех технологий и материалов для гидроизоляции оросительных каналов и выбор оптимального решения по совокупности гидротехнических, эксплуатационных и экономических показателей в условиях повышенной минерализации воды и интенсивных климатических воздействий, характерных для ЮФО.

Задачи исследований:

- 1) провести комплексную диагностику технического состояния каналов шести оросительных систем ЮФО и количественно оценить вклад основных деструктивных факторов;
- 2) выполнить натурные сравнительные испытания гидроизоляции на опытных участках с одинаковыми гидравлическими параметрами;
- 3) оценить каждую технологию гидроизоляции по водонепроницаемости, фильтрационным потерям, адгезионной прочности и долговечности с применением статистических методов;
- 4) сравнить технологии экономически методом анализа затрат на жизненный цикл с учетом индексации ремонтных работ и тарифов на водопользование;

5) разработать рекомендации по выбору технологии для различных условий эксплуатации.

Материалы и методы. Объектами исследований служат шесть оросительных систем в разных природно-климатических зонах ЮФО. Суммарная протяженность обследованных участков 45,5 км. На каждом участке выделялись контрольные зоны длиной 150–200 м, на которых поочередно применялась каждая из четырех сравниваемых технологий (рисунок 1).



a – Нижне-Донская ОС (Ростовская обл.), год ввода 1952;

b – ОС «Коммунар» (Астраханская обл.), год ввода 1973;

c – ОС «0-71» (Астраханская обл.), год ввода 1973;

d – Заволжская ОС (Волгоградская обл.), год ввода 1968;

e – Генераловская ОС (Волгоградская обл.), год ввода 1959;

f – Палласовская ОС (Волгоградская обл.), год ввода 1961

a – Nizhne-Donskaya irrigation system (Rostov region), commissioning year 1952;

b – “Kommunar” irrigation system (Astrakhan region), commissioning year 1973;

c – Irrigation system “0-71” (Astrakhan region), commissioning year 1973;

d – Zavolzhskaya irrigation system (Volgograd region), commissioning year 1968;

e – Generalovskaya irrigation system (Volgograd region), commissioning year 1959;

f – Pallasovskaya irrigation system (Volgograd region), commissioning year 1961

**Рисунок 1 – Состояние оросительных систем Южного
федерального округа (фото И. А. Коваленко)**

**Figure 1 – The state of irrigation systems in the Southern
Federal District (photo by I. A. Kovalenko)**

Комплексная диагностика технического состояния каналов включала визуально-инструментальное обследование облицовок с картированием дефектов (трещины, сколы, вымывание материала швов, вспучивание и просадка плит), определение фактической прочности бетона методом отрыва со скалыванием и ультразвуковым методом, отбор и лабораторное испытание кернов, определение марки бетона по водонепроницаемости, георадиолокационное профилирование для выявления пустот и зон разуплотнения грунта основания под облицовкой, отбор проб воды для установления минерализации и содержания сульфат-ионов. Методика применения неразрушающего контроля к гидротехническим сооружениям мелиоративного назначения изложена в работах А. П. Истомина, В. Супруни др. [10, 11]. Результат диагностики – интегральная оценка технического состояния каждой системы по СП 100.13330.2016¹.

Сравнивались четыре технологии устройства противофильтрационных покрытий.

Т1 – традиционный цементно-песчаный раствор (цемент М400, песок 0,16–0,63 мм, В / Ц = 0,45), толщина 20–25 мм, ручное торкретирование, 3200 руб./м².

Т2 – полимерцементная композиция (цемент ЦЕМ I 42,5Н, полимерная дисперсия 5 %, микрокремнезем 5 %), толщина 15–20 мм, механизированное торкретирование, 3800 руб./м².

Т3 – жидкая резина (битумно-полимерная эмульсия с армирующей сеткой), толщина 3–5 мм, напыление, 4500 руб./м².

Т4 – модифицированный фибробетон с добавлением диоксида кремния (цемент ЦЕМ I 42,5Н, SiO₂ 2 %, полипропиленовая фибра 1,5 кг/м³,

¹Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85: СП 100.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. М.: Минстрой России, 2016.

суперпластификатор 1,2 %, водно-щелочной раствор $\text{Na}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_n$, толщина 25–35 мм, комбинированное нанесение, 4050 руб./м².

Удельная стоимость приведена в ценах 2025 г. и включает стоимость подготовки основания, материалов и производства работ. При эквивалентной ширине смоченного периметра 10 м площадь покрытия на 1 км канала составляет 10000 м², что дает первоначальную стоимость 32,0; 38,0; 45,0 и 40,5 млн руб./км соответственно.

Водонепроницаемость бетона и восстановленных покрытий определяли ускоренным методом по воздухопроницаемости прибором «АГАМА-2РМ» (ГОСТ 12730.5-2018²). Метод основан на регистрации времени, за которое разрежение в изолированной вакуумной камере, прижатой к поверхности покрытия, падает на фиксированную величину, чем плотнее структура материала, тем медленнее восстанавливается давление и тем выше показатель сопротивления проникновению воздуха $m_{\text{ср}}$, с/см³. Перед измерением поверхность очищали от продуктов карбонизации, высолов и рыхлого слоя цементного камня, обеспечивая плотное прилегание уплотнительного кольца камеры. Влажность поверхностного слоя контролировали и приводили к воздушно-сухому состоянию, поскольку избыточная влажность систематически завышает результат. На каждом участке выполняли не менее 15 замеров с шагом 10 м, в каждой точке по три повторности, значения, отклоняющиеся от среднего более чем на два стандартных отклонения, отбраковывали. Марку по водонепроницаемости W назначали по градуировочной зависимости, связывающей $m_{\text{ср}}$ и марку бетона, приведенной в паспорте средства измерений. Коэффициент вариации серии использовали как показатель однородности покрытия (рисунок 2).

²ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. Взамен ГОСТ 12730.5-84. Введ. 2019-09-01. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.



Рисунок 2 – Определение водонепроницаемости прибором «АГАМА-2РМ» (фото И. А. Коваленко)
Figure 2 – Determination of water impermeability with a device AGAMA-2RM (photo by I. A. Kovalenko)

Фильтрационные потери рассчитывались методом электрогидродинамических аналогий по уточненной формуле (1) с гидравлическим градиентом и площадью смоченной поверхности [11]:

$$q_{\phi} = k_{\phi} \cdot I \cdot F_{\text{см}}, \quad (1)$$

где q_{ϕ} – фильтрационный расход, м³/сут;

k_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут;

I – гидравлический градиент, определяется по зависимости:

$$I = \frac{H}{L}, \quad (2)$$

где H – напор, м;

L – длина участка, м;

$F_{\text{см}}$ – площадь смоченной поверхности, м², находим по зависимости:

$$F_{\text{см}} = L \cdot B_{\text{экв}}, \quad (3)$$

где $B_{\text{экв}}$ – эквивалентная ширина смоченного периметра, м.

Адгезионная прочность устанавливалась методом нормального от-

рыва (ГОСТ 28574-2014³, прибор «ПИБ»). Для каждой технологии выполнялось 12 параллельных испытаний.

Долговечность оценивалась по результатам ускоренных испытаний (50 циклов замораживания-оттаивания в 5%-ном растворе сульфата натрия по ГОСТ 10060-2012⁴) и натурного мониторинга продолжительностью 12–36 месяцев. Прогнозирование срока службы проводилось методом экстраполяции с поправочным коэффициентом на региональную климатическую агрессивность.

Коэффициент представляет собой отношение фактического числа циклов замораживания-оттаивания в районе расположения обследованных систем к числу циклов, воспроизводимому в ускоренных испытаниях. Нормативного документа, устанавливающего такой коэффициент для облицовок мелиоративных каналов, в настоящее время не существует, поэтому его значения приняты по результатам собственных наблюдений. Нижняя граница диапазона отвечает участкам с 85 циклами замораживания-оттаивания в год, верхняя – участкам со 110 циклами при минерализации воды свыше 2,0 г/л, климатические характеристики приняты по СП 131.13330.2020⁵. Технико-экономическая оценка выполнена методом анализа стоимости жизненного цикла (ГОСТ Р 27.202-2012⁶), расчетный период 50 лет. В модель включены первоначальная стоимость устройства покрытия и стоимость последующих восстановлений, моменты которых определены по среднему межремонтному периоду каждой технологии [12, 13]. Расчет ведется в по-

³ГОСТ 28574-2014. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий. Взамен ГОСТ 28574-90. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.

⁴ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Взамен ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 10060.1-95, ГОСТ 10060.2-95, ГОСТ 10060.3-95, ГОСТ 10060.4-95. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

⁵Строительная климатология. СНиП 23-01-99*: СП 131.13330.2020: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 24.12.20: введ. в действие с 25.06.21. М.: Минстрой России, 2020. 146 с.

⁶ГОСТ Р 27.202-2012. Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. Введ. 2013-04-01. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

стоянных ценах 2025 г. Номинальная ставка дисконтирования принята на уровне ключевой ставки Банка России, 14,0 % годовых (действует с 27 июля 2026 г.⁷), при среднегодовом темпе индексации цен на материалы и трудозатраты 4,2 % реальная ставка составляет:

$$r = (1 + 0,140) / (1 + 0,042) - 1 = 0,094, \quad (4)$$

т. е. 9,4 % годовых.

Именно эта величина принята в базовом расчете. Устойчивость результата к выбору ставки проверена в диапазоне от 0 до 15 % годовых. Стоимость жизненного цикла рассчитана по затратам на устройство и восстановление покрытия, экономия воды приведена в натуральном выражении (м³ в год на 1 км канала), поскольку ее монетизация требует указания действующего тарифа на подачу воды, устанавливаемого водохозяйственной организацией на конкретный год.

Статистическая обработка данных выполнена в Statistica 10 и MathCad 15. Достоверность различий проверялась по *t*-критерию Стьюдента и посредством однофакторного дисперсионного анализа ($p < 0,05$). Нормальность распределения проверялась критерием Шапиро – Уилка, тесноту связей характеризовал коэффициент детерминации R^2 . Объем выборки для каждого показателя $n \geq 12$, мощность статистических тестов $> 0,85$.

Результаты и обсуждение. Комплексное обследование показало, что 63,7 % обследованных каналов по протяженности (29,0 из 45,5 км) находятся в ограниченно работоспособном или аварийном состоянии. Прочность бетона составляет 8,5–21,7 МПа, в среднем 17,1 МПа, при проектной 30–35 МПа, марка по водонепроницаемости не превышает W6–W8,

⁷Информационное сообщение Банка России от 24 июля 2026 г. «Банк России принял решение снизить ключевую ставку на 25 б. п., до 14,00 % годовых» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Банка России. URL: https://www.cbr.ru/press/pr/?file=24072026_133000key.htm (дата обращения: 08.09.2026).

тогда как СП 41.13330.2012⁸ и СП 100.13330.2016 требуют W12–W20 для гидротехнических сооружений. Сводные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Техническое состояние каналов оросительных систем до восстановления

Table 1 – Technical condition of irrigation canals before restoration

Оросительная система	Протяженность, км	Прочность бетона, МПа	Марка по водонепроницаемости (W)	Износ, %	Техническое состояние
Нижне-Донская	8,5	20,1	8–10	45	Работоспособное
Коммунар	7,0	18,2	6–8	65	Ограниченно работоспособное
0-71	6,5	14,5	4–6	75	Ограниченно работоспособное
Заволжская	8,0	21,7	8–10	60	Работоспособное
Генераловская	7,5	8,5	2–4	90	Аварийное
Палласовская	8,0	19,6	6–8	60	Ограниченно работоспособное
В среднем	45,5	17,1	6–8	66	63,7 % ограниченно работоспособное и аварийное

Главные факторы деградации – сульфатная коррозия и гидроабразивный износ, интенсивность которых возрастает при сезонных колебаниях уровня воды. Именно их сочетание с циклическим замораживанием-оттаиванием отличает ЮФО от большинства других оросительных районов страны.

Сравнительные испытания четырех технологий устройства противофильтрационных покрытий показали существенные различия по всем измеренным параметрам. Статистическая обработка подтвердила значимость различий между Т4 и остальными технологиями на уровне $p < 0,01$ (таблица 2).

⁸Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87: СП 41.13330.2012: утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2012. 67 с.

Таблица 2 – Показатели водонепроницаемости восстановленных покрытий (через 12 месяцев)

Table 2 – Water impermeability indicators of restored coatings (after 12 months)

Технология устройства противо- фильтрационного покрытия	Сопротивление m_{cp} , с/см ³	Марка (W)	Адгезия, МПа	Коэффициент вариации, %
T1 (цементно-песчаный раствор)	6,2–8,5	6–8	1,2–1,5	18,5
T2 (полимерцементные)	12,5–15,8	10–12	1,8–2,1	12,3
T3 (жидкая резина)	10,8–13,2	10–12	1,6–1,9	14,7
T4 (фибробетон, диоксид кремния и водно-щелочной раствор сили- катов натрия $Na_2O((SiO_2)_n)$)	21,0–29,2	12–14	1,98–2,35	8,5
Нормативное значение	$\geq 15,0$	≥ 12	$\geq 1,5$	≤ 15

Технология T4 превосходит остальные по всем параметрам. Сопротивление воздухопроницаемости 21,0–29,2 с/см³ соответствует марке W12–W14. Коэффициент вариации 8,5 % вдвое ниже, чем у T1, что указывает на высокую однородность покрытия.

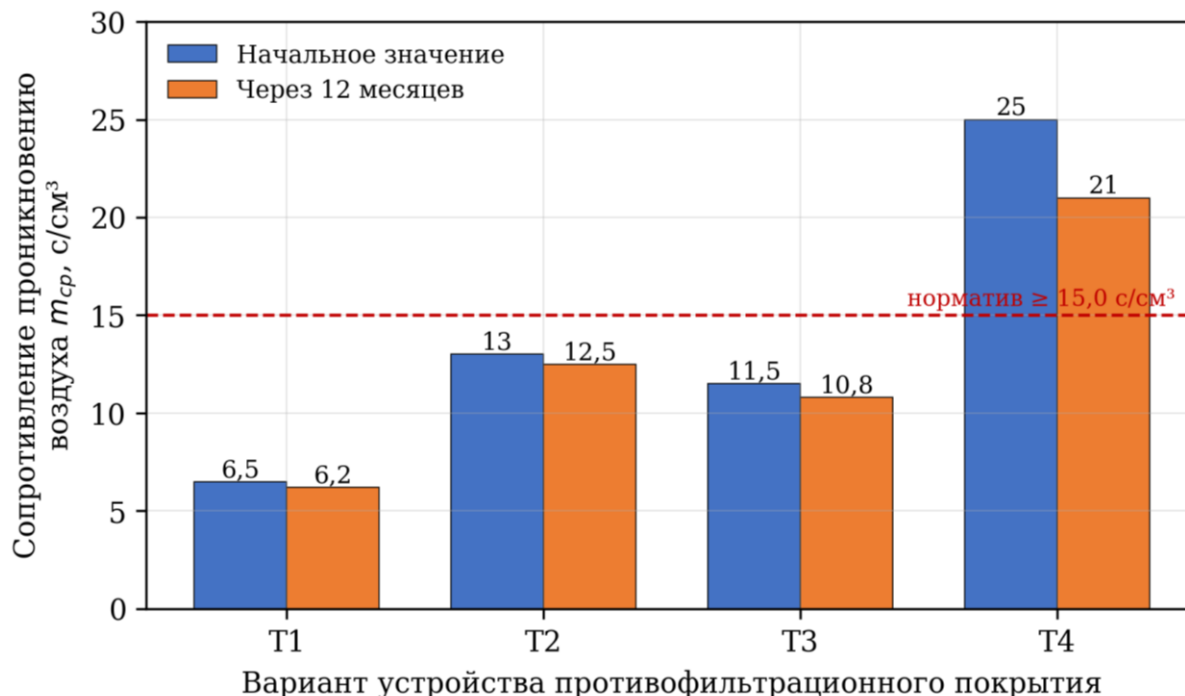
Адгезия 1,98–2,35 МПа обеспечивает надежное сцепление с основанием при температурных деформациях. Технологии T2 и T3 достигают нижней границы нормативных требований, однако W10–W12 – это предел, а не запас. T1 нормативных требований не выполняет и нуждается в частом обновлении (рисунок 3).

После восстановления покрытия канала фильтрационные потери сократились (таблица 3).

Технология T4 сокращает потери на 85–90 %, что в 2–3 раза эффективнее традиционного ремонта. Экономия воды составляет 75000 м³ в год на 1 км канала, эффект зафиксирован на протяжении 24 месяцев мониторинга (рисунок 4).

Динамика фильтрационных потерь (см. рисунок 4) построена по данным натурного мониторинга за первые три года после восстановления (сплошные линии) и по экстраполяции на последующий период (штриховые линии). Обрыв линии соответствует окончанию расчетного срока службы покрытия и означает отсутствие данных, а не нулевые фильтраци-

онные потери, полная водонепроницаемость облицовки на действующем канале недостижима в принципе, и минимальный зафиксированный уровень потерь по варианту Т4 составляет 3–6 %.



T1 – цементно-песчаный раствор; T2 – полимерцементная композиция;
T3 – битумно-полимерная эмульсия (жидкая резина); T4 – модифицированный
фибробетон с диоксидом кремния и водно-щелочным раствором силикатов натрия

T1 – cement-sand composition; T2 – polymer-cement composition;
T3 – bitumen-polymer emulsion (liquid rubber); T4 – modified fiber-reinforced
concrete with silicon dioxide and an aqueous-alkaline solution of sodium silicates

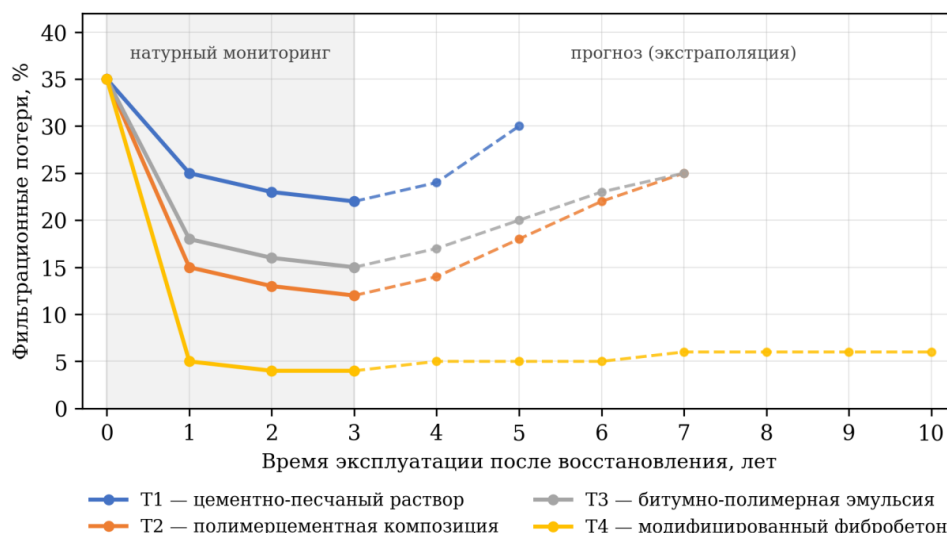
**Рисунок 3 – Сравнение показателей
водонепроницаемости по технологиям**

**Figure 3 – Comparison of water
resistance indicators by technology**

**Таблица 3 – Показатели фильтрационных потерь после
восстановления каналов**

Table 3 – Indicators of filtration losses after canal restoration

Технология устрой- ства противофилтра- ционного покрытия	До восста- новления (%)	После восста- новления (%)	Снижение (%)	Экономия воды, м³/год на 1 км
T1	35–40	20–25	30–45	15000
T2		10–15	60–70	45000
T3		12–18	55–65	40000
T4		3–6	85–90	75000



Разрыв линии означает окончание расчетного срока службы покрытия, а не нулевые потери. Сплошные линии – натурный мониторинг (0–3 года); штриховые – расчетная экстраполяция (4–10 лет)

A broken line indicates the end of the estimated service life of the coating, not zero losses. Solid lines indicate field monitoring (0–3 years); dashed lines indicate estimated extrapolation (4–10 years)

Рисунок 4 – Динамика фильтрационных потерь при различных технологиях

Figure 4 – Dynamics of seepage losses for various technologies

Оценка долговечности покрытий представляла собой комплексную процедуру, включавшую проведение ускоренных испытаний и организацию полевого мониторинга с учетом климатической агрессивности региона (таблица 4).

Таблица 4 – Показатели долговечности технологий гидроизоляции

Table 4 – Durability indicators of waterproofing technologies

Технология устройства противофильтрационного покрытия	Межремонтный период, лет	Циклы замораживания-оттаивания	K_{cc}	Прогнозный срок службы, лет
T1	7–10	50–75	0,65–0,75	10–15
T2	15–20	100–150	0,80–0,85	20–25
T3	12–18	80–120	0,75–0,82	15–20
T4	40–50	200–300	0,90–0,95	40–50

Технология T4 увеличивает межремонтный период в 4–5 раз.

Коэффициент сульфатостойкости $K_{cc} = 0,90–0,95$ отражает плотную структуру фибробетона, обуславливающую замедление диффузии сульфат-ионов [12].

Данный показатель выступает в качестве дифференцирующего критерия, выделяющего Т4 на фоне битумно-полимерных материалов (Т3), для которых K_{cc} снижается при высокой концентрации сульфатов.

Прогноз срока службы 40–50 лет получен экстраполяцией данных ускоренных испытаний и краткосрочного натурного мониторинга. При среднем прогнозном сроке 45 лет это соответствует относительной погрешности $\pm 18\text{--}22\%$, т. е. той же величине, что и для остальных технологий. Для Т1 при межремонтном периоде 8,5 года погрешность $\pm 20\%$ дает $\pm 1,7$ года. Абсолютная погрешность растет пропорционально прогнозируемому сроку и сама по себе не свидетельствует о меньшей достоверности оценки для Т4. Устойчивость экономического вывода к этой погрешности проверена прямым пересчетом при нижней консервативной границе 30 лет вместо 45, стоимость жизненного цикла Т4 возрастает с 41,2 до 43,2 млн руб./км, а преимущество перед традиционным ремонтом сохраняется и составляет 1,37 раза вместо 1,44.

Технико-экономические показатели технологий приведены в таблице 5. Моменты восстановления покрытия определены по среднему межремонтному периоду из таблицы 4: для Т1 – 8,5 года, для Т2 – 17,5 года, для Т3 – 15,0 года, для Т4 – 45,0 года. Затраты приведены к начальному моменту при реальной ставке дисконтирования 9,4 % годовых.

Таблица 5 – Технико-экономические показатели технологий гидроизоляции (на 1 км канала)

Table 5 – Technical and economic indicators of waterproofing technologies (per 1 km of canal)

Показатель	T1	T2	T3	T4
1	2	3	4	5
Первоначальная стоимость, млн руб.	32,0	38,0	45,0	40,5
Средний межремонтный период, лет	8,5	17,5	15,0	45,0
Количество восстановлений за 50 лет	5	2	3	1
Стоимость жизненного цикла (дисконтированная), млн руб.	59,3	47,5	60,5	41,2
Среднегодовые приведенные затраты, млн руб./год	5,64	4,52	5,76	3,92

Продолжение таблицы 5

Table 5 continued

1	2	3	4	5
Чистый дисконтированный эффект относительно Т1, млн руб.	–	11,8	–1,2	18,1
Срок окупаемости относительно Т1, лет	–	8,5	Не окупается	8,5
Примечание – Расчет в постоянных ценах 2025 г. при реальной ставке дисконтирования 9,4 % годовых.				

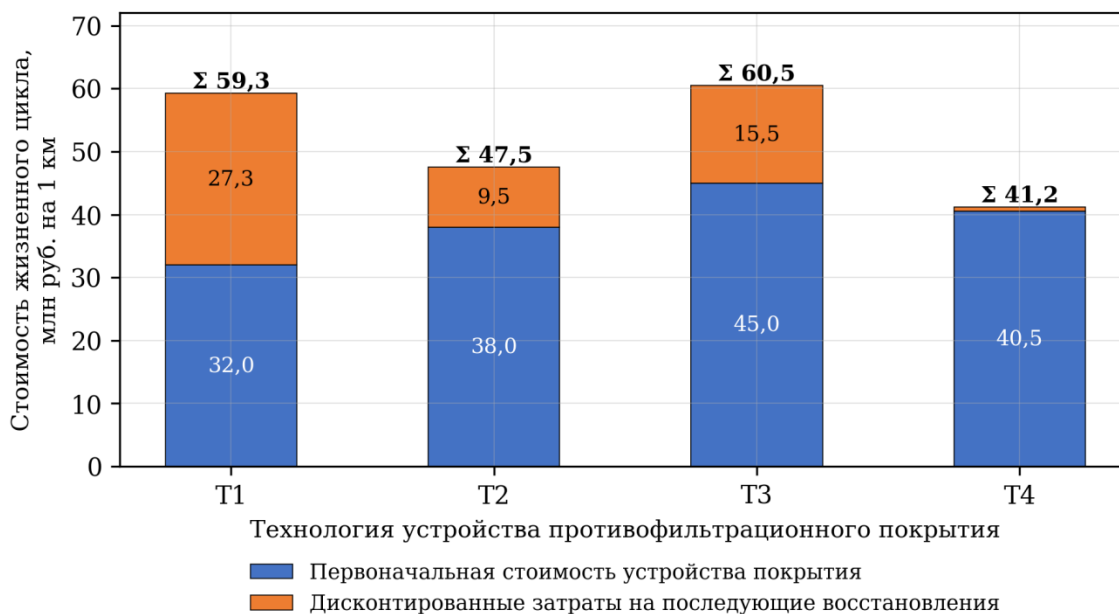
Наименьшую стоимость жизненного цикла обеспечивает технология Т4 – 41,2 млн руб./км против 59,3 млн руб. при традиционном цементно-песчаном ремонте, т. е. в 1,44 раза ниже. Чистый дисконтированный эффект составляет 18,1 млн руб./км за расчетный период, среднегодовой – 1,72 млн руб./км. Дополнительные вложения в Т4 относительно Т1 (8,5 млн руб./км) окупаются к сроку 8,5 года – к моменту первого восстановления традиционного покрытия, когда затраты по технологии Т1 скачкообразно возрастают. Основной вклад в эффект делает не экономия воды, а исключение четырех ремонтных циклов из пятидесятилетнего периода (рисунок 5).

Отдельного комментария требует технология Т3. При недисконтированном счете она выглядит дешевле традиционного ремонта, однако при реальной ставке 9,4 % ее стоимость жизненного цикла (60,5 млн руб./км) оказывается выше, чем у Т1 (59,3 млн руб.), самая высокая первоначальная стоимость сочетается со средним межремонтным периодом всего 15 лет, и дисконтирование обесценивает отдаленную экономию. Экономический эффект технологии Т3 при принятой ставке отрицателен.

Поскольку результат зависит от принятой ставки дисконтирования, выполнен анализ чувствительности стоимости жизненного цикла к ставке дисконтирования (таблица 6, рисунок 6).

Ранжирование технологий устойчиво, Т4 остается наименее затратной во всем диапазоне ставок от 0 до 15 % годовых. Количественная оцен-

ка выигрыша при этом существенно зависит от ставки, отношение стоимости жизненного цикла T1 к T4 меняется от 2,37 до 1,13. Приводившаяся в предварительных расчетах величина 5,8–6,2 получена без дисконтирования и при неучтенном восстановлении по технологии T4 на 45-м году эксплуатации, поэтому не подтверждается.



Расчетный период 50 лет, постоянные цены, реальная ставка дисконтирования 9,4 % годовых

Calculation period: 50 years, constant prices, real discount rate: 9.4% per annum

Рисунок 5 – Структура стоимости жизненного цикла противофильтрационных покрытий

Figure 5 – Life-cycle cost structure of anti-seepage coatings

Таблица 6 – Стоимость жизненного цикла гидроизоляционного покрытия при использовании различных технологий для разных ставок дисконтирования

В млн руб./км

Table 6 – Life cycle cost of impervious coating using various technologies for different discount rates

In million rubles/km

Реальная ставка, % годовых	T1	T2	T3	T4	T1 / T4	Лучшая технология
1	2	3	4	5	6	7
0 (без дисконтирования)	192,0	114,0	180,0	81,0	2,37	T4
2,2 (эквивалент исходной 6,5 %)	127,0	81,7	117,8	55,7	2,28	T4

Продолжение таблицы 6

Table 6 continued

1	2	3	4	5	6	7
5,0	86,4	61,1	82,1	45,0	1,92	T4
9,4 (принятая)	59,3	47,5	60,5	41,2	1,44	T4
12,0	51,6	43,9	55,0	40,7	1,27	T4
15,0	46,0	41,6	51,3	40,6	1,13	T4

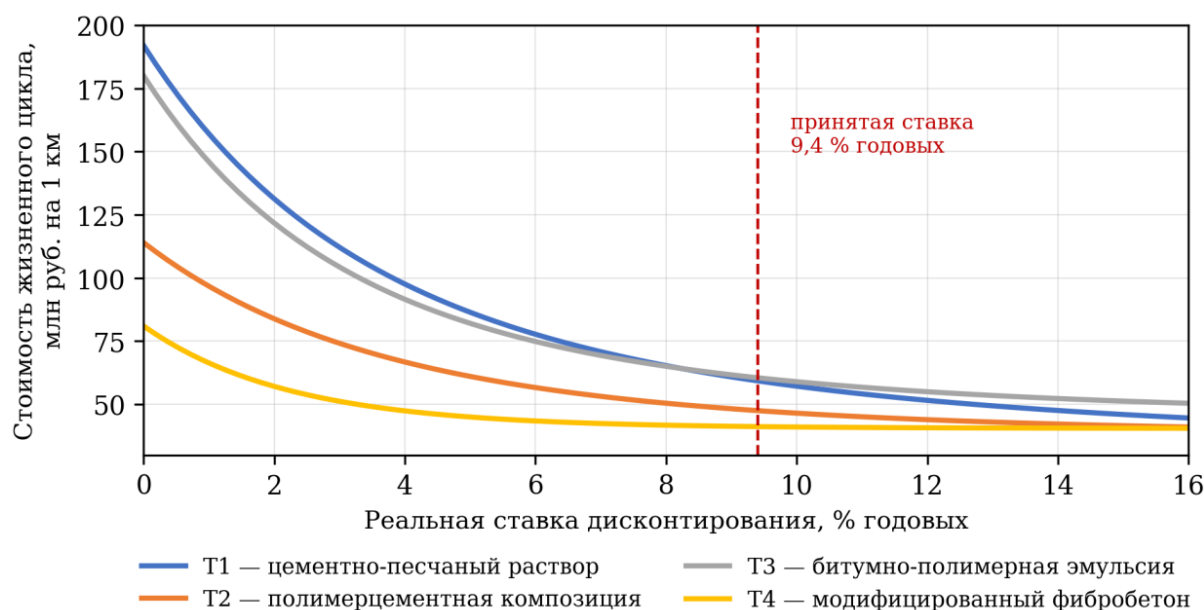


Рисунок 6 – Зависимость стоимости жизненного цикла гидроизоляционного покрытия от ставки дисконтирования при применении различных технологий

Figure 6 – Dependence of the life cycle cost of a impervious coating on the discount rate when using various technologies

При возрастании минерализации воды сравнительное преимущество фибробетона перед другими рассматриваемыми технологиями увеличивается (таблица 7).

Таблица 7 – Влияние минерализации воды на снижение фильтрационных потерь

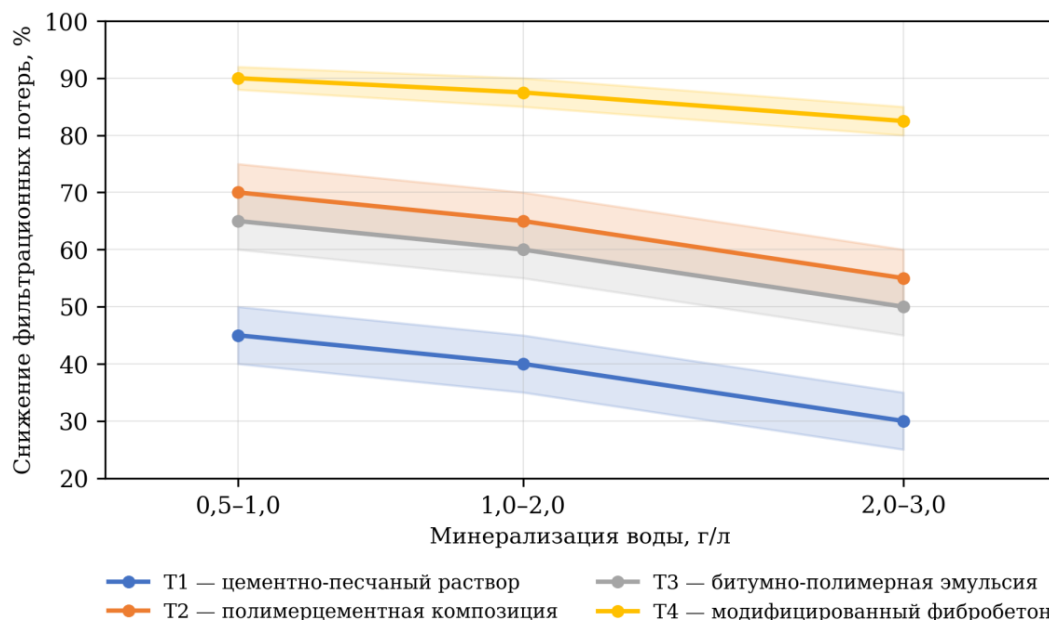
В %

Table 7 – Effect of water mineralization on the filtration loss reduction

In %

Минерализация, г/л	Сульфаты, мг/л	T1	T2	T3	T4
0,5–1,0	100–300	40–50	65–75	60–70	88–92
1,0–2,0	300–600	35–45	60–70	55–65	85–90
2,0–3,0	600–1000	25–35	50–60	45–55	80–85

Традиционные решения при минерализации свыше 2,0 г/л теряют 15–20 % эффективности из-за ускоренного разрушения цементного камня и расслоения битумных эмульсий (рисунок 7).



Заливка – диапазон значений по таблице 7, линия – середина диапазона
Filling in is the range of values according to table 7, line is the midpoint of the range

Рисунок 7 – Зависимость эффективности технологий гидроизоляции от минерализации воды

Figure 7 – Dependence of the efficiency of waterproofing technologies on water mineralization

Рекомендации по выбору технологии. На основе полученных результатов составлены дифференцированные рекомендации (таблица 8).

Таблица 8 – Рекомендации по выбору технологии гидроизоляции

Table 8 – Recommendations for choosing impervious technology

Условия эксплуатации	Рекомендуемая технология	Обоснование
Минерализация < 1,0 г/л, умеренный климат	T2 или T4	Приемлемое соотношение стоимости и эффективности
Минерализация 1,0–2,0 г/л, циклическое замораживание	T4	Высокая сульфатостойкость и морозостойкость
Минерализация > 2,0 г/л, сульфатная агрессия	T4	Единственная технология, сохраняющая эффективность
Аварийное состояние (износ > 80 %)	T4	Максимальная долговечность и адгезия
Ограниченное финансирование	T2	Приемлемая эффективность при меньшей начальной стоимости

Несмотря на высокие показатели, технология Т4 имеет ряд практических ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании и производстве работ [14].

Прогноз срока службы 40–50 лет получен экстраполяцией данных ускоренных испытаний и краткосрочного натурного мониторинга (12–36 месяцев).

На участке ОС «Коммунар» была установлена чувствительность полиуретанового слоя к влажности основания, при содержании влаги более 8 % наблюдалось локальное отслоение покрытия. Это потребовало введения технологических перерывов и применения дополнительных гидрофобизаторов.

Нанесение полиуретана требует двухкомпонентного оборудования высокого давления. Работы не допускаются при температуре воздуха ниже плюс 5 °С и относительной влажности более 80 %. Указанные ограничения зафиксированы в разработанном технологическом регламенте и должны контролироваться при масштабировании на другие объекты.

Выводы

1 Комплексная диагностика шести оросительных систем ЮФО показала: 63,7 % обследованных каналов по протяженности находятся в ограниченно работоспособном или аварийном состоянии, прочность бетона 8,5–21,7 МПа (в среднем 17,1 МПа) при проектной 30–35 МПа, марка по водонепроницаемости W6–W8 – ниже нормативной.

2 По совокупности ключевых показателей преимущество имеет технология Т4 (модифицированный фибробетон): водонепроницаемость W12–W14, адгезия 1,98–2,35 МПа, коэффициент вариации 8,5 %, снижение фильтрационных потерь на 85–90 %.

3 Долговечность покрытия, выполненного по технологии Т4, превышает показатели традиционных решений в 4–5 раз при межремонтном периоде 40–50 лет и $K_{cc} = 0,90–0,95$. При минерализации $> 2,0$ г/л фиксируется стабильность показателей, в то время как для Т1–Т3 наблюдается деградация.

4 Стоимость жизненного цикла покрытия при применении технологии Т4 при реальной ставке дисконтирования 9,4 % годовых составляет 41,2 млн руб./км против 59,3 млн руб. при традиционном ремонте, т. е. в 1,44 раза ниже. Чистый дисконтированный эффект 18,1 млн руб./км за расчетный период 50 лет, среднегодовой эффект 1,72 млн руб./км. Срок окупаемости дополнительных вложений 8,5 года. Экономия воды составляет 75000 м³ в год на 1 км канала. Ранжирование технологий устойчиво во всем диапазоне ставок дисконтирования от 0 до 15 % годовых.

5 Для реализации метода регламентируются требования к влажности основания (< 8 %), к диапазону температуры нанесения (+5...+35 °С) и к наличию специализированного оборудования. Внедрение рекомендуется поэтапное: в первую очередь на участках с аварийным состоянием и высокой агрессивностью с последующим распространением на объекты со средней и низкой минерализацией.

Список источников

1. Пахомов А. А., Кулагина О. А., Колобанова Н. А. Современный мелиоративный комплекс – стратегический фактор развития сельских территорий // Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Волгоград, 2017. Т. 2. С. 421–427. EDN: ZNIZUN.
2. Талалаева В. Ф., Баев О. А., Колганов А. В. Результаты оценки технического состояния водопроводящей сети каналов и сооружений Республики Калмыкии // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 1. С. 12–17. DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-12-17. EDN: XOWSZZ.
3. Бандурин М. А., Волосухин В. А. Безопасность сооружений водного хозяйства юга России: новые вызовы и пути решения. Краснодар: Кубанский ГАУ, 2021. 203 с. EDN: UFENAQ.
4. Гарбуз А. Ю., Талалаева В. Ф. Технология ремонта бетонных облицовок каналов битумно-полимерной мастикой // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 3. С. 299–313. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-299-313. EDN: BWOBXB.
5. Гарбуз А. Ю. Ремонт повреждений облицовок длительно работающих каналов с использованием полимерных композиций // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2015. № 2(58). С. 33–39. EDN: TZLZVN.
6. The efficiency of impervious protection of hydraulic structures of irrigation systems / M. A. Bandurin, V. A. Volosukhin, I. F. Yurchenko, V. V. Vanzha, A. V. Mikheyev // International scientific and practical conference “Agro-SMART – Smart solutions for agriculture” (Agro-SMART 2018). Vol. 151. Tyumen: Atlantis Press, 2018. P. 56–61. EDN: YUEQZF.
7. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Теоретическая оценка водопроницаемости противофильтрационной облицовки нарушенной сплошности // Известия высших учебных

заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 3(178). С. 68–74. EDN: SEZRCD.

8. Kosichenko Yu. M., Baev O. A. Selection of an effective seepage-control lining for canals made of traditional and geosynthetic materials // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54, no. 6. P. 819–824. DOI: 10.1007/s10749-021-01293-4. EDN: BGPPXV.

9. Ищенко А. В., Баев О. А. Оценка эффективности противофильтрационного экрана на Донском магистральном канале // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 4(29). С. 67–72. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.11. EDN: YVSVJR.

10. Применение методов неразрушающего контроля для обследования гидротехнических сооружений / А. П. Истомин, Д. А. Солодовников, С. А. Истомин, И. А. Коваленко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1(73). С. 381–392. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43. EDN: HXAPOU.

11. Suprun V., Kovalenko I., Ustinova V. The GPR survey method in combination with destructive testing methods for the hydraulic structures technical condition studying // Magazine of Civil Engineering. 2024. Vol. 17, № 6(130). 13002. DOI: 10.34910/MCE.130.2. EDN: PNKOED.

12. Баев О. А. Расчеты установившейся свободной фильтрации из необлицованных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 227–243. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-227-243. EDN: TGXTOJ.

13. Ксензов А. А. Мелиорация земель и эксплуатация мелиоративных систем в Нечерноземной зоне Российской Федерации: собр. науч. и науч.-метод. тр. В 7 т. Т. 1. Тверь: ТвГУ, 2017. 461 с. EDN: XRAOEP.

14. Осадчий С. Д., Герасимович Н. М., Мусиенко С. П. Анализ и подходы к разработке проектных технологических решений реконструкции и ремонта гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2007. № 8. С. 7–11. EDN: IASVFH.

References

1. Pakhomov A.A., Kulagina O.A., Kolobanova N.A., 2017. *Sovremennyy meliorativnyy kompleks – strategicheskiy faktor razvitiya sel'skikh territoriy* [Modern land reclamation complex – a strategic factor in the development of rural areas]. *Ekologo-meliorativnye aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological and Reclamation Aspects of Rational Nature Management: Proc. of the International Scientific-Practical Conference]. Volgograd, vol. 2, pp. 421–427, EDN: ZNIZUN. (In Russian).

2. Talalaeva V.F., Baev O.A., Kolganov A.V., 2025. *Rezultaty otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya vodoprovodnyashchey seti kanalov i sooruzheniy Respubliki Kalmykii* [The results of the technical condition assessment water supply network of canals and structures the Republic of Kalmykia]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 1, pp. 12–17, DOI: 10.32962/0235-2524-2025-1-12-17, EDN: XOWSZZ. (In Russian).

3. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., 2021. *Bezopasnost' sooruzheniy vodnogo khozyaystva yuga Rossii: novye vyzovy i puti resheniya* [Safety of Water Management Facilities in the South of Russia: New Challenges and Solutions]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University, 203 p., EDN: UFENAQ. (In Russian).

4. Garbuz A.Yu., Talalaeva V.F., 2021. *Tekhnologiya remonta betonnykh oblitsovok kanalov bitumno-polimernoy mastikoy* [Repair technology of canal concrete lining with bitumen-polymer mastic]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 11, no. 3, pp. 299–313, DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-299-313, EDN: BWOBXB. (In Russian).

5. Garbuz A.Yu., 2015. *Remont povrezhdeniy oblitsovok dlitel'no rabotayushchikh kanalov s ispol'zovaniem polimernykh kompozitsiy* [Repair of lining damage of long-term op-

erating canals using polymer compositions]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(58), pp. 33-39, EDN: TZLZVN. (In Russian).

6. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Yurchenko I.F., Vanzha V.V., Mikheev A.V., 2018. The efficiency of impervious protection of hydraulic structures of irrigation systems. International Scientific and Practical Conference “Agro-SMART – Smart Solutions for Agriculture” (Agro-SMART 2018), vol. 151, Tyumen, Atlantis Press, pp. 56-61, EDN: YUEQZF.

7. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Teoreticheskaya otsenka vodopronitsaemosti protivofil'tratsionnoy oblitsovki narushennoy sploshnosti* [Theoretical assessment of water permeability of impervious facing discontinuities]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 3(178), pp. 68-74, EDN: SEZRCD. (In Russian).

8. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2021. Selection of an effective seepage-control lining for canals made of traditional and geosynthetic materials. *Power Technology and Engineering*, vol. 54, no. 6, pp. 819-824, DOI: 10.1007/s10749-021-01293-4, EDN: BGPPXV.

9. Ishchenko A.V., Baev O.A., 2017. *Otsenka effektivnosti protivofil'tratsionnogo ekrana na Donskom magistral'nom kanale* [Evaluation of the efficiency of the impervious screen on the Don Main Canal]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], vol. 7, no. 4(29), pp. 67-72, DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.11, EDN: YVSVJR. (In Russian).

10. Istomin A.P., Solodovnikov D.A., Istomin S.A., Kovalenko I.A., 2024. *Primenenie metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya obsledovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Application of non-destructive testing methods for inspection of hydraulic structures]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 1(73), pp. 381-392, DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43, EDN: HXAPOY. (In Russian).

11. Suprun V., Kovalenko I., Ustinova V., 2024. The GPR survey method in combination with destructive testing methods for the hydraulic structures technical condition studying. *Magazine of Civil Engineering*, vol. 17, no. 6(130), 13002, DOI: 10.34910/MCE.130.2, EDN: PNKOED.

12. Baev O.A., 2022. *Raschety ustanovivsheysya svobodnoy fil'tratsii iz neoblitsovannykh kanalov* [Calculations of steady free seepage from unlined canal]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 12, no. 3, pp. 227-243, DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-227-243, EDN: TGXTOJ. (In Russian).

13. Ksenzov A.A., 2017. *Melioratsiya zemel' i ekspluatatsiya meliorativnykh sistem v Nechernozemnoy zone Rossiyskoy Federatsii: sobr. nauch. i nauch.-metod. tr.* [Land Reclamation and Operation of Reclamation Systems in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation: Coll. Scientific and Methodological Works]. In 7 vols., vol. 1, Tver, Tver State University, 461 p., EDN: XRAOEP. (In Russian).

14. Osadchiy S.D., Gerasimovich N.M., Musienko S.P., 2007. *Analiz i podkhody k razrabotke proektnykh tekhnologicheskikh resheniy rekonstruktsii i remonta gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Analysis and approaches to the development of design technological solutions for the reconstruction and repair of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 8, pp. 7-11, EDN: IASVFH. (In Russian).

Информация об авторе

И. А. Коваленко – инженер-исследователь, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук (400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 97), kovalenko-i@vfanc.ru, SPIN-код: 1449-0995, ORCID: 0009-0001-3147-6613.

Information about the author

I. A. Kovalenko – Research Engineer, Federal Scientific Center for Agroecology, Complex Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences (400062, Volgograd, Universitetsky ave., 97), kovalenko-i@vfanc.ru, SPIN-code: 1449-0995, ORCID: 0009-0001-3147-6613.

*Автор несет ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.
The author is responsible for violation of scientific publication ethics.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 01.06.2026; одобрена после рецензирования 25.09.2026;
принята к публикации 29.09.2026.
The article was submitted 01.06.2026; approved after reviewing 25.09.2026; accepted for
publication 29.09.2026.*