

На правах рукописи

Сафин Эмиль Эдикович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Саратов - 2026

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»

**Научный
руководитель:**

Абдразаков Фярид Кинжаевич,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Бандурин Михаил Александрович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»,
декан факультета гидромелиорации

Баев Олег Андреевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБНУ
«Российский научно исследовательский институт
проблем мелиорации», ведущий научный
сотрудник, начальник гидротехнического отдела,

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
аграрный университет»

Защита состоится «__» _____ 2026 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, д. 60, ауд.325 им. А.В. Дружкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Вавиловский университет и на сайте www.vavilovsar.ru

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 410012, г. Саратов, пр-т им. П. Столыпина, зд. 4, стр. 3. E-mail: dissovet01@vavilovsar.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Татьяна Анатольевна Панкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Орошение сельскохозяйственных культур играет важную роль в получении высоких и стабильных урожаев. В настоящее время протяжённость водопроводящих сооружений в федеральной собственности составляет более 23 тыс. км, и около 20 % из них облицованы. Для обеспечения эффективной работы оросительных систем необходимо поддерживать транспортирующую и водопроводящую функции каналов.

Важным направлением при эксплуатации оросительных каналов является необходимость снижения потерь воды на фильтрацию, которая достигает 20–30 % от водозабора. Значительные потери на фильтрацию обуславливаются низким техническим уровнем, а также разрушением бетонных покрытий вследствие длительного срока эксплуатации и отсутствия периодического технического обслуживания и ремонта.

К 1990-м годам площадь мелиорируемых земель достигла 35 млн га, что дало прирост продукции растениеводства в пределах 80 %. Вследствие отсутствия проводимых работ по их ремонту и восстановлению, начиная с 1990-х годов, техническое состояние оросительных каналов и качество орошения ухудшилось, что в свою очередь привело к разрушению и неэффективности оросительных каналов.

Анализ состояния оросительных каналов показывает, что дефекты покрытия наблюдаются на значительной их части, что приводит к существенным потерям воды, росту эксплуатационных затрат. Традиционные способы ремонта и замены (бетонные плиты) часто отличаются высокой капиталоемкостью, длительными сроками работ.

Вместе с тем в литературе и на практике отмечается растущий интерес к инновационным технологиям и материалам, которые потенциально позволяют снизить как потери воды, так и стоимость жизненного цикла сооружений.

Однако требуется ряд технологических решений совершенствования технологий укладки, подбора композитных материалов, разработки комплексной методологии сравнительной оценки надёжности и экономической эффективности альтернативных технологий в реальных эксплуатационных условиях.

На решение проблемы недостаточной изученности и ограниченного применения инновационных композитных материалов для повышения эффективности защитных покрытий оросительных каналов направлена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы. Развитие тематики повышения эффективности эксплуатации оросительных каналов и гидротехнических сооружений мелиоративных систем занимались такие учёные, как Ф.К. Абдразаков, В.А. Волосухин, М.А. Бандурин, О.А. Баев, Д.Г. Горюнов, Н.Н. Дубенок, Ю.М. Косиченко, А.Е. Новиков, А.С. Овчинников, В.И. Ольгаренко, Г.В. Ольгаренко, Д.А. Соловьёв, В.А. Шевченко, В.Н. Щедрин.

Проблемам увеличения эффективности защитных покрытий оросительных каналов за счет применения композитных материалов были

посвящены работы таких учёных, как Ю.М. Косиченко, Ф.К. Абдразаков, М.А. Бандурин, О.А. Баев, А.Ю. Гарбуз, А.А. Рукавишников.

Однако, несмотря на значительный объём накопленных знаний, тема повышения эффективности защитных покрытий оросительных каналов за счет применения композитных материалов остаётся раскрытой лишь частично.

В большинстве работ основное внимание уделяется традиционным бетонным облицовкам, тогда как систематизированные данные о долговременной эффективности и экономической целесообразности современных композитных материалов в России представлены фрагментарно.

В связи с этим возникает объективная необходимость в дальнейшей работе по данной тематике, направленной на обоснование и расширение практического внедрения инновационных композитных материалов в практику ремонта и реконструкции, эксплуатации оросительных каналов.

Цель исследования – исключение потерь воды на фильтрацию за счет обоснования и применения композитных материалов в качестве альтернативы традиционной бетонной облицовке на оросительных каналах.

Задачи исследования:

- 1) провести мониторинг состояния оросительных каналов и анализ исследований применения инновационных композитных материалов;
- 2) теоретически обосновать предпосылки усовершенствования технологии укладки инновационными композитными материалами оросительных каналов;
- 3) разработать математическую модель для выбора инновационных материалов в качестве облицовки оросительных каналов;
- 4) провести экспериментальные лабораторные исследования для определения физико-механических свойств (показателей) инновационных композитных материалов;
- 5) выполнить технико-экономическое обоснование применения композитных материалов для облицовки оросительных каналов.

Объектом исследования являются оросительные каналы.

Предмет исследования – влияние защитных покрытий оросительных каналов на фильтрацию и потери воды.

Научная новизна результатов исследования:

- усовершенствованная технология строительства защитных покрытий оросительных каналов за счет применения композитных материалов;
- впервые предложена математическая модель для выбора инновационных материалов в качестве облицовки оросительных каналов;
- результаты лабораторных исследований композитных материалов на растяжение, продавливание и водонепроницаемость;
- технико-экономическое обоснование применения инновационных композитных материалов для облицовки оросительных каналов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследования заключается в разработке математической модели многокритериального выбора композитного облицовочного материала,

обосновании теоретических положений совершенствования технологии укладки композитных облицовок и получении новых экспериментальных данных о прочностных характеристиках геокомпозитов «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000» при растяжении и статическом продавливании.

Практическая значимость работы заключается в разработке усовершенствованной технологии укладки инновационного композитного материала «КАПЛАМ 1000» и внедрении на Самарском филиале ФГБУ «Управление «Саратовмелиоводхоз», Куйбышевском обводнительно-оросительном канале. Результаты внедрения подтвердили экономическую эффективность. Из расчётов следует, что себестоимость облицовки 1 м² канала с использованием бетонной плиты составит 1 999 руб., а себестоимость с использованием композитного материала – 620 руб., то есть 1 м² облицовки канала из композитного материала в 3,2 раза дешевле, чем бетонная облицовка. Также при использовании композитного материала в 2,34 раза увеличивается скорость укладки по сравнению с бетонной плитой.

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы использовались теоретические методы – математическое моделирование, системный анализ. Проводились экспериментальные испытания на растяжение, для чего был выбран ГОСТ Р 56785-2015 Композиты полимерные. Для определения сопротивления статическому продавливанию (испытание шариком) и водонепроницаемости был использован ГОСТ 2678-94.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованная технология строительства и реконструкции облицовки оросительных каналов инновационными композитными материалами, исключающая фильтрацию воды и позволяющая снизить сроки строительства;
- математическая модель для выбора инновационных материалов в качестве облицовки оросительных каналов;
- лабораторные исследования инновационного композитного материала на растяжение, продавливание и водонепроницаемость;
- технология применения инновационных композитных материалов для защитных покрытий оросительных каналов;
- технико-экономические обоснование эффективности применения композитных материалов по сравнению с традиционной бетонной облицовкой.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается лабораторными исследованиями, применением современных государственных стандартов при организации и проведении испытаний. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием «АПК России: образование, наука, производство» (Саратов, 2022 г.); на ежегодных конференциях ППС и аспирантов кафедры «Гидромелиорация,

природообустройство и строительство в АПК» ФГБОУ ВО Вавиловского университета (Саратов, 2023–2026 гг.); на международных научно-практических конференциях «Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР академика МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В. (Рязань, 2023 г.) и «Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции» (Москва, 2023 г.), на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации» (Новочеркасск, 2024 г.).

Результаты исследований внедрены на Куйбышевском обводнительно-оросительном канале.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 15 – в сборниках докладов по материалам всероссийских и международных конференций. Общий объём с учетом долевого участия в коллективных публикациях составляет 7.2 печ.л., из них 3,8 печ.л. принадлежат автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Текст изложен на 124 страницах и содержит 26 рисунков, 19 таблиц, 2 приложения, акт внедрения. Список литературы включает в себя 111 наименований, включая 8 публикаций на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования, отражены основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, а также апробация результатов исследования и объем публикаций по теме диссертации.

В первой главе «Состояние изученности вопроса. Цель и задачи исследования» представлен анализ отечественной и зарубежной научной литературы об опыте применения традиционных и композитных материалов для ремонта бетонных облицовок. При обследовании технического состояния оросительных каналов Саратовской области было выявлено, что имеются следующие дефекты: сколы в бетоне, оползание, сдвиг и выпор бетонных плит, а также разрушение деформационных швов.

В дальнейшем для повышения эффективности защитных покрытий оросительных каналов за счет применения композитных материалов и для экономии средств, сокращения сроков проводимых работ нужно внедрять композитные материалы ввиду их несомненных преимуществ перед традиционными материалами.

Выполнен обзор существующих композитных облицовочных материалов, применяемых для защитных покрытий оросительных каналов.

Выявлены основные проблемы, заключающиеся в применении устаревших технологий и материалов для ремонтных работ на оросительных каналах.

Проведен анализ известных работ и исследований в области применения новейших композитных материалов для ремонтных работ, который выявил недостаточную проработку при создании конструктивно-технологических решений из композитных материалов. В связи с этим необходимо провести исследования для определения инновационных материалов и выбора среди них лучших по таким параметрам, как прочность, водонепроницаемость, доступность и стоимость материала.

Во второй главе *«Технологические и теоретические предпосылки повышения эффективности защитных покрытий оросительных каналов за счет применения композитных материалов»* рассмотрены теоретические и технологические аспекты использования и монтажа инновационных композитных материалов для защитных покрытий оросительных каналов, а также приведено математическое описание технологического процесса и применяемых технологий.

Одним из ключевых факторов, определяющих необходимость применения противofильтрационных (защитных) облицовок, являются значительные потери воды на фильтрацию из оросительных каналов. Для количественной оценки этих потерь и обоснования экономической целесообразности внедрения композитных материалов в работе использованы методы гидравлического расчёта фильтрации.

Для обеспечения корректности сравнения расчёт выполнен для канала длиной 1000 м с одинаковыми геометрическими параметрами, исходные данные представлены в таблице 1, а итоговые данные в таблице 2.

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта

Параметр	Обозначение	Значение
Ширина канала по дну	b	5 м
Глубина наполнения водой	$h_{\text{ср}}$	1,5 м
Заложение откосов	m	1
Толщина бетонной облицовки	t	0,12 м
Длина участка	L	1000 м
Коэффициент фильтрации бетона	$k_{\text{обл}}$	0,0005 м/сут

Расчёт фильтрации был произведен формулой для определения фильтрационных потерь из облицованных каналов (Приложение У, СП 100.13330.2016):

$$Q_{\text{ф}} = k_{\text{обл}} \frac{h_{\text{ср}}}{t} \cdot \chi L, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ф}}$ – фильтрационный расход, м³/сут.; $k_{\text{обл}}$ – коэффициент фильтрации материала облицовки, м/сут; $h_{\text{ср}}$ – средняя глубина воды в канале, м; t –

толщина облицовки, м; χ – смоченный периметр канала, м; L – длина участка, м.

Расчёт смоченного периметра:

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \quad (2)$$

тогда $\chi = 5 + 2 \cdot 1,5 \sqrt{(1 + 1^2)} = 5 + 4,24 = 9,24$ м,

где b – ширина канала по дну, м; h – глубина воды в канале, м; m – коэффициент заложения откосов.

Расчёт фильтрационных потерь (Q_{ϕ}):

$$Q_{\phi} = 0,0005 \cdot 1,5/0,12 \cdot 9,24 \cdot 1000 = 57,75 \text{ м}^3/\text{сут.}; \quad (3)$$

$$Q_{\phi} = 57,75 \text{ м}^3/\text{сут.} = 2,41 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (4)$$

Сезонный объём потерь:

$$W_{\text{год}} = Q_{\phi} \cdot 122 = 57,75 \cdot 122 = 7\,045,5 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (5)$$

Таблица 2 - Результаты расчёта фильтрации через облицовку

Показатель	Бетонная облицовка	Композитная облицовка «КАПЛАМ»
Коэффициент фильтрации k , м/сут.	0,0005	0 (водонепроницаема по ГОСТ 2678-94)
Потери на 1 км, м ³ /сут.	57,75	
Потери на 1 км, м ³ /год (поливной сезон)	7 045,5	

Полученные данные убедительно доказывают, что даже технически исправная бетонная облицовка не является абсолютным барьером для воды.

Полученные значения подтверждают, что в условиях Саратовского Заволжья фильтрационные потери из облицованных оросительных каналов могут достигать 20–30 % от подаваемого расхода. Это обосновывает необходимость эффективных противофильтрационных облицовок, в том числе инновационных композитных материалов, обеспечивающих снижение водонепроницаемости до значений, близких к нулю.

Таким образом, математическая модель выбора материала, описанная ниже, учитывает в числе прочих критерий Р9 – водонепроницаемость (потери воды, л/м²·сут.), что позволяет количественно оценить вклад каждого материала в сокращение фильтрационных потерь и повышение эффективности эксплуатации оросительных каналов. Количественная оценка фильтрационных потерь подтверждает необходимость применения эффективных противофильтрационных облицовок. Для обоснованного выбора оптимального материала, обеспечивающего минимальную водонепроницаемость при заданных технических и экономических ограничениях, в работе разработана многокритериальная математическая модель.

В общем виде матрица принятия решений $M_{\text{пр}}$ имеет общий вид и содержит m строк и n столбцов. Ее размерность $m \times n$ зависит от количества исследуемых материалов и учитываемых в данной работе критериев. В

таблице 3 материалы, изучаемые в работе, расположены в столбцах, оценочные критерии в строках.

Различие критериев P_j и Q_j состоит в их смысловой нагрузке, так как некоторые из них (P_j) определяют качество материала с учетом их минимального значения, при этом Q_j указывают на улучшение качества материала при максимальных значениях.

Таким образом, критерий

$$q_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}, \quad (6)$$

где a_{ij} – первоначальная характеристика критерия, выраженная в числовом виде.

Таблица 3 - Матрица принятия решений $M_{пр}$

Материалы M_i	Оценочные критерии P_j					Оценочные критерии Q_j				Сумма критериев P_j, Q_j
	$\frac{P_j, Q_j}{M_j}$	P_1	P_2	...	P_n	Q_1	Q_2	...	Q_n	R_i
	M_1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1n}	q_{11}	q_{12}	...	q_{1n}	R_1
	M_2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2n}	q_{21}	q_{22}	...	q_{2n}	R_2
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	M_{i-1}	...	...	p_{i-1j}	...	...	...	q_{i-1j}	...	R_{i-1}
	M_i	...	...	p_{ij}	...	...	...	q_{ij}	...	R_i
	M_{i+1}	...	...	p_{i+1j}	...	...	...	q_{i+1j}	...	R_{i+1}
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	M_m	p_{m1}	p_{m2}	...	p_{mn}	p_{m1}	p_{m2}	...	q_{mn}	R_m
	OM_i									$R_{min} = \min R$

Для получения сравнительной оценки характеристик был введен коэффициент K_{ii+1} . В таблице 3 также присутствует сумма R_i , которая находится по формуле

$$R_i = \sum_{j=1}^n (p_{ij} + q_{ij}), \quad (7)$$

В таблице 3 результирующей константой будет являться минимум, то есть:

$$\min R_i = \sum_{i=1}^n (p_{ij} + q_{ij}), \quad (8)$$

Результирующая R_i соответствует материалу M_i и равна сумме числовых значений его характеристик:

$$R_i = \sum_{j=1}^{m,n} (p_{ij} + q_{ij}). \quad (9)$$

В случае $i > 1$, имеем систему (10), соответствующую наполняемости таблицы 3:

$$\begin{cases} R_1 = \sum_{j=1}^n (p_{1j} + q_{1j}), \\ R_2 = \sum_{j=1}^n (p_{2j} + q_{2j}), \\ R_m = \sum_{j=1}^n (p_{mj} + q_{mj}). \end{cases} \quad (10)$$

Каждая строка системы (10) соответствует i -й строке таблицы 3.

В процессе заполнения матрицы $M_{\text{пр}}$ по выбору оптимального решения в таблице 4 были введены следующие обозначения:

M_1 – сборные железобетонные плиты, M_2 – бетонное полотно, M_3 – геокомпозит гидроизоляционный «КАПЛАМ», M_4 – геокомпозитные бентонитовые маты.

Обозначения критериев в соответствии с матрицей $M_{\text{пр}}$ и таблицей 3:

P_1 – стоимость материала за 1 кв/м², руб., P_2 – стоимость работ за 1 кв/м², руб., P_3 – срок укладки, количество дней, P_4 – трудоёмкость, чел./день, P_5 – количество привлекаемой спецтехники, ед., P_6 – количество привлекаемых работников, чел., P_7 – требования к подготовке основания, P_8 – масса материала, кг, P_9 – водонепроницаемость (потери воды), л/м²/сут.

Q_1 – плановый срок эксплуатации, количество лет, Q_2 – морозостойкость, количество циклов, Q_3 – химическая стойкость, Q_4 – устойчивость к УФ-излучению, количество лет до деградации, Q_5 – ремонтпригодность, Q_6 – прочность при растяжении, Q_7 – сопротивление биологическому обрастанию (прорастание древесно-кустарниковой растительностью), Q_8 – температурная стойкость (диапазон), °С, Q_9 – стойкость к механическим повреждениям, Q_{10} – сопротивление статическому продавливанию. В рамках построения многокритериальной модели выбора материала для облицовки оросительного канала использовались экспертные оценки, представленные в таблице 4. По каждому из 19 критериев (9 минимизируемых $P_1...P_9$) и 10 максимизируемых ($Q_1...Q_{10}$) материалам ($M_1...M_4$) присвоены баллы от 1 до 4, где 1 соответствует наилучшему значению среди всех рассматриваемых материалов, а 4 – худшему. Для наглядности также был построен график (рисунок 1).

Таблица 4 - Рейтинговая оценка P и Q матрицы $M_{пр}$ для материалов M_i

Материалы, M_i	Оценочные критерии P_j									Оценочные критерии Q_j										Сумма критериев P_j, Q_j	
		P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 10	R_i
	M_1	3	4	3	4	4	4	3	4	4	3	2	4	1	2	2	3	4	1	1	2,94
	M_2	4	3	4	3	2	2	1	3	3	1	3	3	1	1	3	1	2	2	2	2,31
	M_3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	3	4	1,57
	M_4	1	1	2	1	3	3	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	3	1,84
	OM_i																				

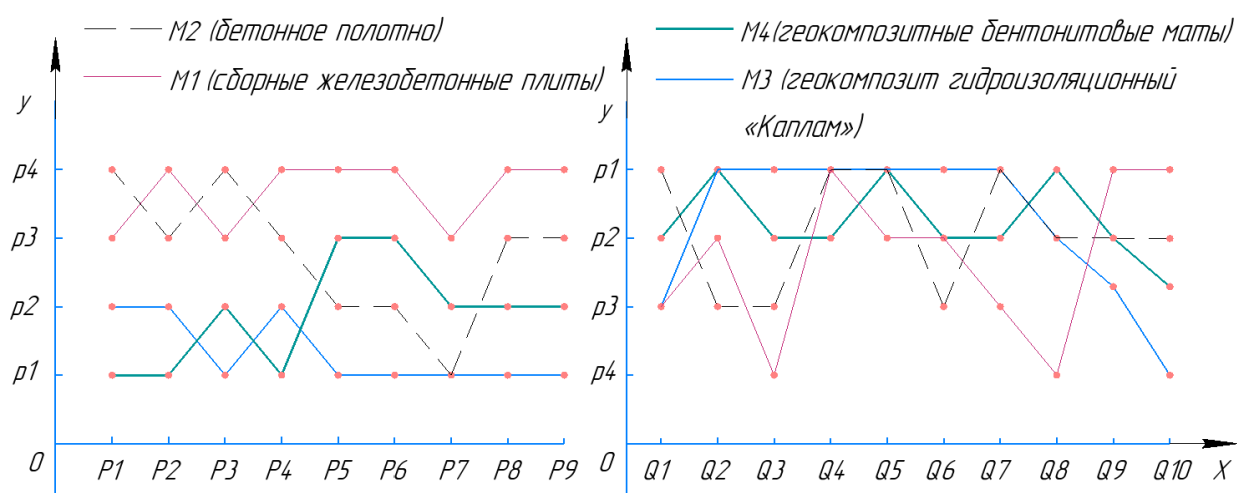


Рисунок 1 - Зависимость выбора материалов M от характеристик P и Q , матрица $M_{пр}$

Разработана математическая модель многокритериального выбора материала для облицовки оросительных каналов, включающая в себя 19 технико-эксплуатационных свойств. Выполнены расчёты фильтрационных потерь для типовых каналов Саратовского Заволжья, подтвердившие необходимость применения противофильтрационных облицовок. Модель позволяет ранжировать альтернативы, по рейтинговой оценке, матрицы $M_{пр}$ и обосновывать выбор материала с наилучшим сочетанием прочностных, гидравлических и технологических характеристик.

В третьей главе «Программа, методика и результаты лабораторных исследований» приводятся описание экспериментальных установок и результаты проведённых лабораторных исследований с инновационными композитными материалами.

Нами были подготовлены экспериментальные образцы материалов «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000» для испытаний материалов на прочность при растяжении (толщиной 0,5 и 1 мм).

По итогу пяти повторений данного эксперимента для каждого материала удалось получить следующие результаты (таблица 5, рисунки 2–5).



Рисунок 2 - Установка образца «КАПЛАМ 500» в тиски



Рисунок 3 - Результат эксперимента «КАПЛАМ 500» на растяжение

Таблица 5 - Показатели испытаний на прочность при растяжении материалов «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000»

материалов «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000»				
Материал	Метод	№ опыта	Показатель предела прочности, кН/м	Визуальный результат
«КАПЛАМ 500»	ГОСТ Р 56785–2015	1	36	Отрыв
		2	38	
		3	38	
		4	37	
		5	36	
«КАПЛАМ 1000»		1	70	
		2	69	
		3	71	
		4	70	
		5	68	

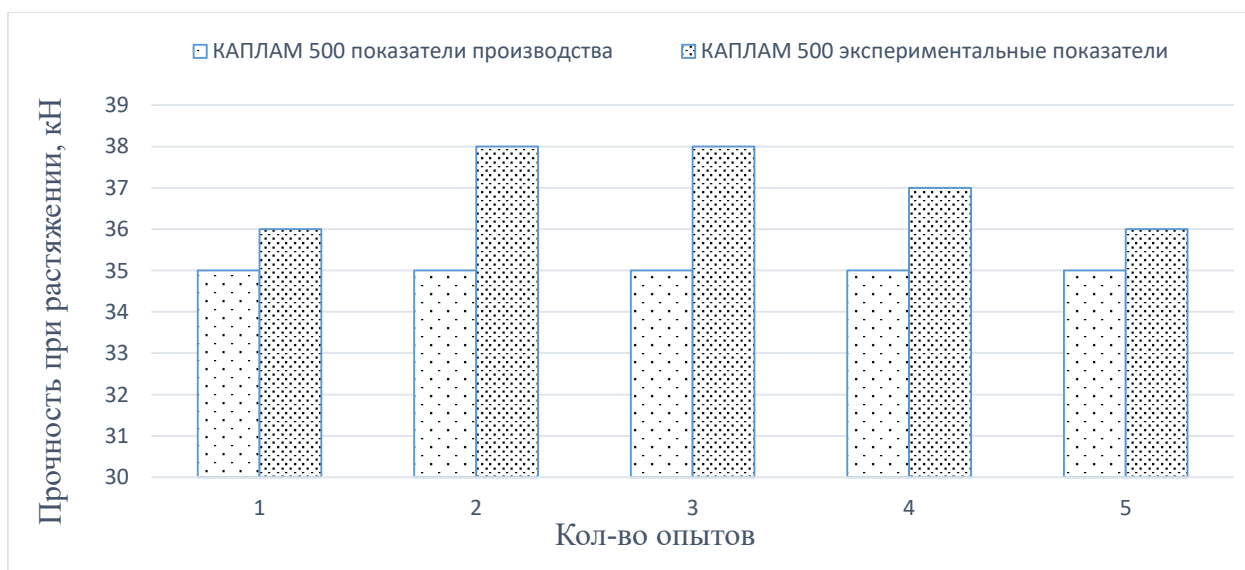


Рисунок 4 - Показатели прочности при растяжении на лабораторных исследованиях материалов «КАПЛАМ 500»



Рисунок 5 - Показатели прочности при растяжении на лабораторных исследованиях материалов «КАПЛАМ 1000»

Образец материал «КАПЛАМ 1000», как и предполагалось, выдержал более высокую нагрузку. Предел прочности выше из-за его толщины.

По результатам испытаний мы получили свойства, доказывающие, что композитные материалы «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000» обладают прочностью при растяжении, заявленной производителем.

Нами были проведены исследования для определения сопротивления статическому продавливанию образцов геокомпозитов «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000». Для этого были подготовлены экспериментальные образцы композитного материала (толщиной 0,5 и 1 мм). Результаты исследования представлены в таблице 6 и на рисунках 6, 7.

Испытание проведено в соответствии с ГОСТ 2678-94 по определению сопротивления статическому продавливанию (испытание шариком).



Рисунок 6 - Испытание на продавливание материала «КАПЛАМ»



Рисунок 7 - Общий вид зоны продавливания материала «КАПЛАМ»

Таблица 6 - Испытания для определения сопротивления статическому продавливанию композитных материалов

Материал	Метод	Параметры испытания	Смещение, мм	Комментарий
«КАПЛАМ 500»	ГОСТ 2678-94	Скорость ~10 мм/мин, песчаная подсыпка, рамка	3,8	Локальная вдавленность, возможно частичное расслоение
«КАПЛАМ 1000»		Скорость ~10 мм/мин, та же конфигурация	5,9	Значительно большая стойкость

При испытании на водонепроницаемость в течение установленного времени (72 ч) при заданном давлении (0,3 МПа) образцы материалов «Гидроизоляционный геокомпозит КАПЛАМ 500 и 1000» показали свою водонепроницаемость.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что композитные материалы «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000» обладают прочностью при статическом продавливании, заявленной производителем. Эти данные подтверждают нашу теорию о том, что использование указанных перспективных композитных материалов является необходимостью в настоящее время, ведь по сравнению с традиционными материалами, композиты имеют ряд важных преимуществ.

В четвертой главе «*Результаты испытаний и анализа эффективности применения инновационных материалов*» установлено, что полученные технико-экономические свойства подтверждают необходимость рассмотрения не только стоимостных характеристик материалов, но и особенностей технологической реализации каждого варианта облицовки. Результаты итоговых расчетов представлены в таблице 7 и на рисунке 8.

Таблица 7 - Техничко-технологические свойства сравниваемых технологий

Параметр	Бетонные плиты	Композитная облицовка
Техника	8 ед.	5 ед.
Привлекаемые кадры	21 чел.	15 чел.
Материалы	806 плит	8 500 м ² геомембр. + геотекст.
Доставка	194 рейса	1 рейс
Сроки	35 дней	17 дней

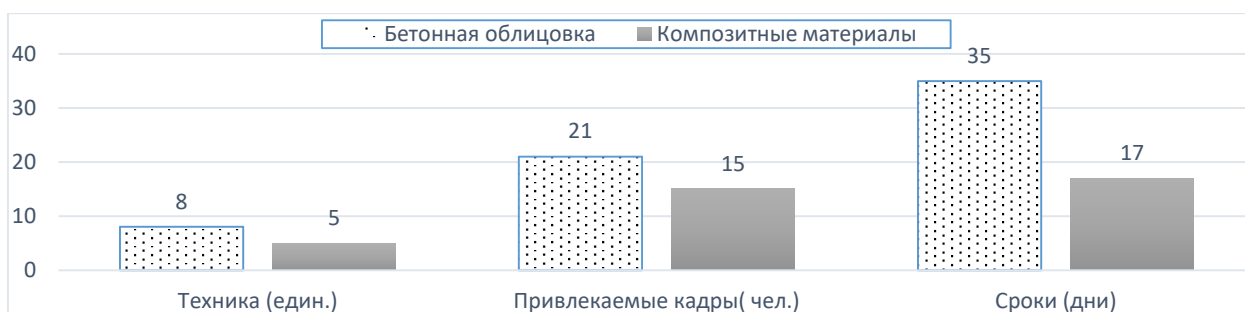


Рисунок 8 - Техничко-технологические свойства сравниваемых технологий

Ниже приведены виды работ и применяемой техники при устройстве бетонной и композитной облицовок оросительного канала (таблица 8).

Таблица 8 - Техничко-технологические свойства сравниваемых технологий

Вид работ	Техника	Назначение
Геодезическая разбивка	Геодезическое оборудование	Вынос осей, отметок
Очистка полосы отвода	Кусторезы на базе МТЗ-82.1, бульдозер ДЗ-42, погрузчик ПК-12-02, КамАЗ-6520	Удаление растительности
Разработка грунта	Экскаватор Кранэкс ЕК-400, КамАЗ-6520	Снятие растительного слоя, выемка грунта
Планировка основания	ДЗ-42, УДС-4321-5	Выравнивание дна и откосов
Подготовка и уплотнение основания	Виброплита TSS-RP160D и вибрационный каток DM-614	Уплотнение основания для облицовки канала
Работы по укладке бетонных плит		
Устройство песчано-гравийной смеси	КАМАЗ-6520, ДЗ-42, TSS-RP160D	Подготовка основания для последующей укладки бетонных плит
Доставка плит	КамАЗ-54901	Подвоз плит к объект
Разгрузка плит	Автокран КС-65713-1	Разгрузка и подача плит
Монтаж плит		Укладка плит
Герметизация швов	Компрессор ПКСД-5,25 Д, Экструдер/пистолет для герметика	Заполнение швов герметиком
Работы по укладке композитного материала		
Доставка рулонов «КАПЛАМ»	КамАЗ-6520	Подвоз материалов
Разгрузка рулонов	Кран-манипулятор КМА-10К	Подача к месту разгрузки
Укладка композита		Раскатка и монтаж полотен
Сварка полотен	MELTPLAST 900, Теплоконт РЭС-1	Герметичное соединение
Создание анкерного замка	TSS-RP160D	Закрепление кромки геокомпозита и предотвращения его сдвига

В пятой главе «Техничко-экономическое обоснование применения инновационных композитных облицовок» приводятся расчёты экономической эффективности применения композитного материала, сравнительный анализ затрат при облицовке канала композитным материалом и бетонной облицовкой (таблица 9, рисунки 9, 10).

Для установления перспектив использования композитных материалов для облицовки оросительных каналов были использованы формулы для определения полной стоимости облицовки канала:

1. Бетонные плиты:

$$C_{ц}(\text{бетон}) = C_{м} + C_{с} + C_{л} + C_{е} + C_{т} + C_{к}, \quad (11)$$

где $C_{м}$ – стоимость бетонных плит, руб.; $C_{с}$ – стоимость строительно-монтажных работ, руб.; $C_{л}$ – затраты на логистику, руб.; $C_{е}$ –

эксплуатационные затраты на 30 лет, руб.; C_T - затраты на герметизацию, швы и финишную обработку, руб.; C_K – контроль качества, руб.

2. Композитный материал (геомембрана)

$$C_{\text{ц}}(\text{композит}) = C_M' + C_c' + C_{\text{л}}' + C_e' + C_K', \quad (12)$$

где C_M' – стоимость композитной мембраны, руб.; C_c' – стоимость монтажных работ, руб.; $C_{\text{л}}'$ – логистика, руб.; C_e' – эксплуатационные затраты на 30 лет, руб.; C_K' – контроль качества + герметизация швов, руб.

Исходя из этого мы можем определить срок окупаемости, год:

$$H = \frac{C_{\text{ц}}}{\text{Э}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{ц}}$ – полная стоимость, руб., Э – ежегодная экономия, руб./год.

Предложена формула для определения себестоимости укладки 1 м² облицовочного материала:

$$C_{\text{с.б.}} = \frac{C_{\text{ц}}}{S}, \quad (14)$$

где $C_{\text{ц}}$ – полная стоимость (руб.), S – площадь канала, м².

Таблица 9 - Экономические показатели сравниваемых вариантов облицовки

Вариант облицовки	Капитальные затраты $C_{\text{кап}}$, руб.	Эксплуатационные расходы, руб./год
«КАПЛАМ-500»	3 147 000	17 435
«КАПЛАМ-1000»	5 272 000	23 810
ПВХ-мембрана	9 785 000	97 850
Бетонные плиты	16 988 000	192 000

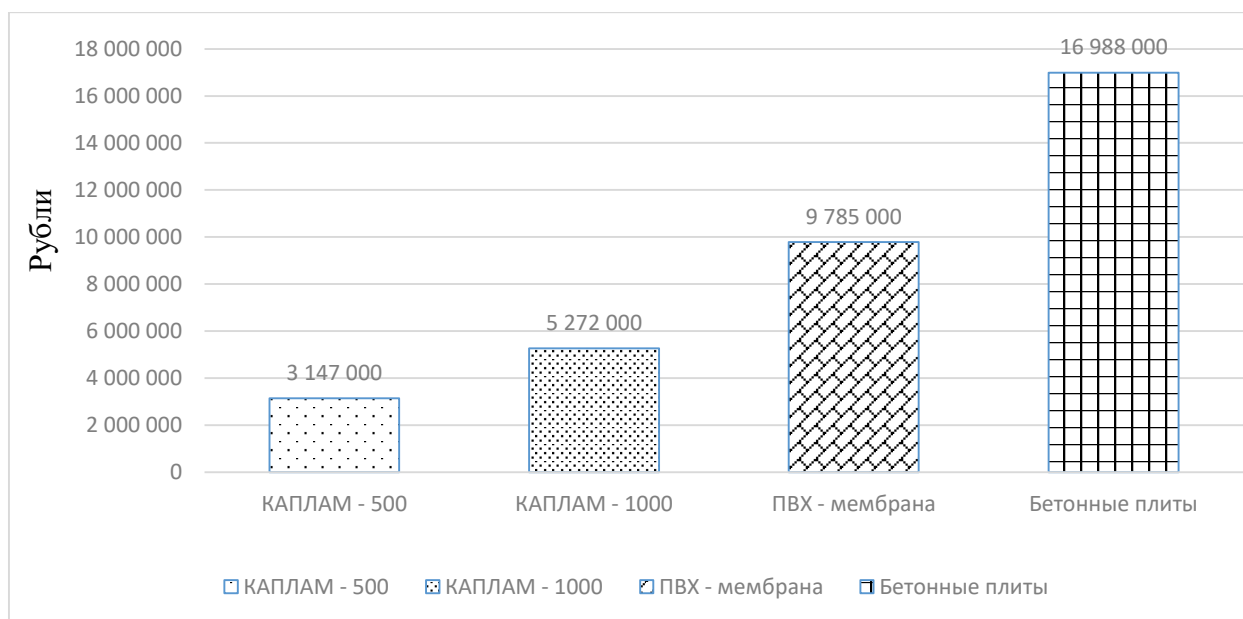


Рисунок 9 - Капитальные затраты на строительство облицованных оросительных каналов, рубли

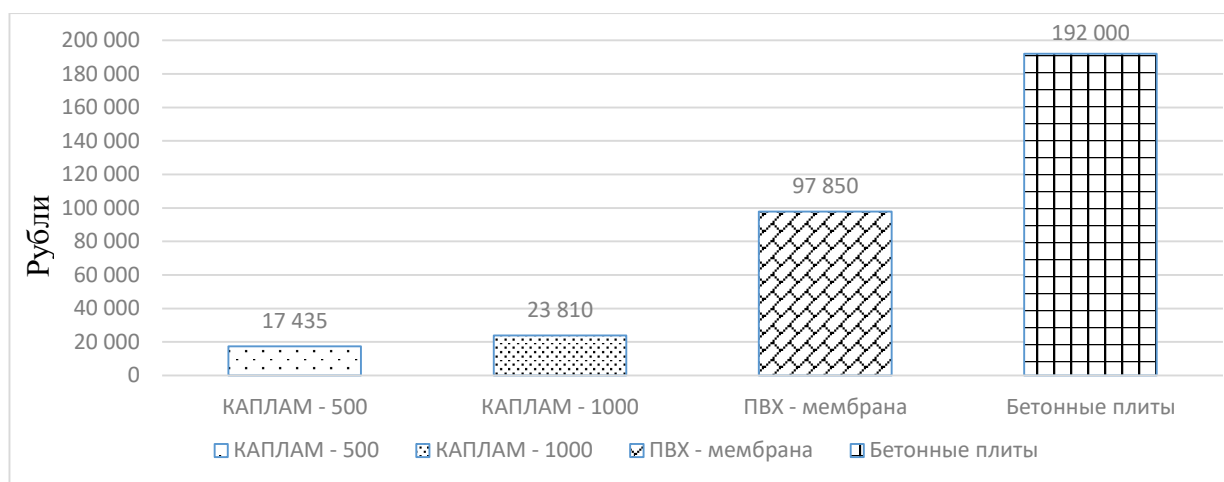


Рисунок 10 - Эксплуатационные расходы для облицовки оросительных каналов, руб./год

На основе исследований установлено, что композитная облицовка по общим затратам выгоднее бетонных плит: стоимость 1 м² композита «КАПЛАМ 500» составит 370 руб., «КАПЛАМ 1000» – 620 руб., в то же время стоимость 1 м² бетонной облицовки составит 1999 руб., у композита, эксплуатационные расходы – примерно в 8 раз ниже. Расчётный срок окупаемости при типичных параметрах составит 3,5 года.

Из этого следует, что при использовании инновационного геокомпозита «КАПЛАМ 500» по сравнению с бетонной облицовкой на оросительном канале длиной 1000 м и площадью 8500 м² экономическая эффективность составит 13,851 млн руб, а при использовании «КАПЛАМ 1000» 11,716 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно мониторингу, проведенному в ходе исследований, установлен высокий физический износ (более 50 %), который сопровождается динамикой увеличения, что в свою очередь вызывает необходимость увеличения объема проводимых ремонтно-восстановительных работ. Полевые исследования подтвердили, что традиционные облицовочные покрытия уступают инновационным композитным материалам по ряду характеристик, поэтому внедрение последних обеспечит как технико-технологический, так и экономический эффект.

2. Теоретически обоснованы и подтверждены организационно-технологические решения по укладке композитных облицовок, оптимизирующие регламент монтажа и состав бригад. Расчёт трудоёмкости показал сокращение продолжительности работ на 18 дней по сравнению с бетонной облицовкой.

3. Разработана математическая модель выбора геосинтетических материалов, используемых при облицовке каналов, учитывающих такие показатели, как стоимость, водонепроницаемость, прочность к растяжению, стойкость к продавливанию, стойкость к химическому и ультрафиолетовому

воздействию и другие показатели. Модель позволяет получить сортировку альтернатив и обосновать оптимальный выбор материала.

4. Проведенные лабораторные испытания выявили, что средний предел прочности при растяжении составляет 37 кН/м для «КАПЛАМ-500» и 69 кН/м для «КАПЛАМ-1000»; при проведении испытаний статическому продавливанию – смещение образцов на 3,8 и 5,9 мм. соответственно. При испытании на водонепроницаемость (72 ч, 0,3 МПа) «КАПЛАМ 500 и 1000» показали полную герметичность. Полученные данные подтверждают высокие прочностные и гидроизоляционные результаты, заявленные производителем характеристикам и обосновывают целесообразность применения усиленных вариантов («КАПЛАМ-1000») на участках с повышенными механическими нагрузками.

5. Сравнительные расчеты для участка протяженностью 1 км (8 500 м²) показали, что геокомпозит «КАПЛАМ-500» обеспечивает минимальные приведённые затраты, демонстрируя лучшее соотношение «стоимость – срок службы – эксплуатационные расходы». «КАПЛАМ-1000» при более высокой прочности и долговечности сохраняет экономическую привлекательность для зон с повышенными механическими рисками. Экономические сценарии подтвердили устойчивое снижение суммарных затрат без ухудшения эксплуатационных показателей. Экономическая эффективность по сравнению с бетонной облицовкой составляет 13,851 млн руб. для «КАПЛАМ-500» и 11,716 млн руб. для «КАПЛАМ-1000».

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

1. Для строительства защитных покрытий оросительных каналов необходимо применять инновационные композитные материалы, совмещающие надёжность, водонепроницаемость, малую трудоёмкость и низкие расходы. Материалы «КАПЛАМ 500» и «КАПЛАМ 1000» позволяют ускорить процесс облицовки при минимальном количестве техники и рабочих.

2. Выбор облицовочного материала рекомендуем проводить с помощью математической модели, позволяющей выбрать материал и технологические решения наиболее оптимального варианта облицовки.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

1. Проведение длительного мониторинга эксплуатационных характеристик. Для окончательного подтверждения заявленных сроков службы необходима организация опытно-производственных участков с систематическим контролем водопроницаемости, механической целостности и стойкости к биологическому обрастанию композитных облицовок в реальных климатических условиях Саратовского Заволжья в течение не менее 5–10 лет.

2. Актуальной задачей остаётся разработка и апробация средств малой механизации для укладки геомембран в труднодоступных местах (участки со сложным рельефом, стеснённые условия при ремонте локальных повреждений), что позволит дополнительно снизить трудоёмкость и стоимость монтажных работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Абдразаков, Ф.К. Разработка адаптивных технологий эксплуатации оросительных каналов, покрытых бетонным полотном / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников, **Э.Э. Сафин** // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 11. – С. 4–8.
2. Абдразаков, Ф.К. Покрытие оросительных каналов инновационным бетонным полотном и адаптивные способы их эксплуатации / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников, **Э.Э. Сафин** // Мелиорация и водное хозяйство. – 2023. – № 2. – С. 32–36.
3. Абдразаков, Ф.К. Методы диагностики облицованных оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников, **Э.Э. Сафин** // Природообустройство. – 2024. – № 5. – С. 21–27.
4. Абдразаков, Ф.К. Техничко-экономическое обоснование применения геомембран и геотекстиля для облицовки каналов / Ф.К. Абдразаков, **Э.Э. Сафин**, А.А. Рукавишников // Природообустройство. – 2025. – № 4. – С. 51–59.
5. Абдразаков, Ф.К. Инновационный геокомпозит «КАПЛАМ» эффективнее по сравнению с бетонной облицовкой оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, А.А. Рукавишников, **Э.Э. Сафин** // Мелиорация и водное хозяйство. – 2025. – № 6. – С. 3–7.

В журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций:

6. Абдразаков, Ф.К. Состояние противofильтрационных покрытий оросительных каналов и пути их совершенствования / Ф.К. Абдразаков, **Э.Э. Сафин**, А.А. Рукавишников // Основы рационального природопользования: материалы VIII Национальной конференции с международным участием, Саратов, 27–28 октября 2022 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2022. – С. 3–7.
7. Абдразаков, Ф.К. Современное состояние оросительных облицованных каналов Саратовской области и пути их совершенствования / Ф.К. Абдразаков, **Э.Э. Сафин** // АПК России: образование, наука, производство: сборник статей V Всероссийской. (нац.) науч.-практ. конф. с междунар. участием, Саратов, 19-20 декабря 2022 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 168–172.
8. Абдразаков, Ф.К. Дефекты, возникающие при эксплуатации облицованных оросительных каналов, и пути их устранения / Ф.К. Абдразаков, **Э.Э. Сафин** // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки: материалы Регион. науч.-техн. конф., посвящ. 110-летию Вавиловского университета, Саратов, 13–17 февраля 2023 года. Вып. 1. – Саратов: Амирит, 2023. – С. 165–171.

9. Абдразаков, Ф.К. Научно обоснованные пути повышения эффективности ремонта облицованных оросительных каналов композитными материалами / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: сборник материалов XVI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 15 февраля 2023 года. – М.: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 125–130.

10. Абдразаков, Ф.К. Современные композитные материалы, применяемые для ремонта облицованных оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы XIII Нац. конф. с междунар. участием, Саратов, 20–21 апреля 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2023. – С. 182–186.

11. Абдразаков, Ф.К. Перспективные способы устранения дефектов облицовки оросительных каналов композитными материалами / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Основы рационального природопользования: материалы IX Нац. конф. с междунар. участием, Саратов, 12–13 октября 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 15–19.

12. Абдразаков, Ф.К. Применение инновационных способов и композитных материалов для проведения эксплуатационно-ремонтных работ на облицованных оросительных каналах / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР академика МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В., Рязанский государственный агротехнологический университет, 07–09 декабря 2023 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет, 2024. – С. 31–34.

13. Abdrazakov, F.K. Condition of impervious covers of irrigation canals and ways to improve them (Состояние непроницаемых покрытий оросительных каналов и пути их улучшения)/ F. K. Abdrazakov, E. E. Safin, E. B. Kalinichenko // Science and education in the XXI century: modern development vectors and prospects, 29 февраля 2024 года, 2024. – P. 166–169.

14. Абдразаков, Ф.К. Инновационные методы устранения дефектов облицованных оросительных каналов и повышение эффективности их ремонта с использованием композитных материалов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки: материалы II Регион. науч.-техн. конф., Саратов, 04–18 марта 2024 года. – Саратов, 2024. – С. 235–241.

15. Абдразаков, Ф.К. Перспективные подходы к ремонту и усовершенствованию облицовки оросительных каналов с применением композитов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы XIV Нац. конф. с междунар. участием,

Саратов, 25–26 апреля 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2024. – С. 271–275.

16. Абдразаков, Ф.К. Композитные геосинтетические материалы - надёжная облицовка оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития аграрной науки: сборник статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 300-летию Российской академии наук, Курган, 25 апреля 2024 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2024. – С. 271–275.

17. Сафин, Э.Э. Инновации в технологии ремонта облицованных оросительных каналов для повышения их долговечности / Э.Э. Сафин // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2024. – № 2(93). – С. 69–78.

18. Абдразаков, Ф.К. Применение геокомпозитных материалов для облицовки оросительных каналов / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин // Основы рационального природопользования: материалы X Нац. конф. с междунар. участием, Саратов, 15 ноября 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, 2024. – С. 3–8.

19. Сафин, Э.Э. Эффективность применения композитных материалов для облицовки оросительных каналов / Э.Э. Сафин // Основы рационального природопользования: материалы XI Нац. конф. с междунар. участием – Саратов: ФГБОУ ВО Вавилонский университет, 2025. – С. 288–293.

20. Абдразаков, Ф.К. Математическая модель выбора эффективного материала для облицовки оросительного канала / Ф.К. Абдразаков, Э.Э. Сафин, С.В. Чумакова // Актуальные вопросы науки и практики: сборник научных статей по материалам XIX Междунар. науч.-практ. конф. (6 марта 2026 г., г. Уфа). – Уфа: Изд. Научно-издательский центр Вестник науки, 2026. – С. 53–60.