

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Научная статья

Мишкин Д.В.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (944664[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются инновационные подходы к разработке и обоснованию риск-ориентированного подхода к оценке техносферной безопасности канализационных насосных станций на примере предприятия «Водоканал» города Хабаровска. В статье рассмотрены основные угрозы, связанные с износом инфраструктуры, агрессивным химическим составом сточных вод и невозможностью полной остановки станции для проведения ремонтных работ. Представлены методы анализа рисков, включая диагностику состояния трубопроводов, и расчёт прочности конструкций. Статья содержит доказательство уравнения прочности трубопровода под действием внутреннего давления и демонстрирует практическое применение риск-ориентированного подхода при эксплуатации объектов водоотведения. Полученные результаты могут быть использованы для повышения надёжности и предотвращения чрезвычайных ситуаций на аналогичных объектах.

Ключевые слова: техносферная безопасность, канализационная насосная станция, риск-ориентированный подход, аварийные ситуации, трубопровод, гидравлический расчет, экологическая безопасность.

RISK-BASED APPROACH TO ENSURING THE SAFETY OF SEWAGE PUMPING STATIONS

Research article

Mishkin D.V.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-3457-1066;

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (944664[at]mail.ru)

Abstract

The article examines innovative approaches to developing and substantiating a risk-oriented approach to assessing the technosphere safety of sewage pumping stations, using the example of the 'Vodokanal' enterprise in Khabarovsk. The paper reviews the main threats associated with infrastructure wear and tear, aggressive chemical composition of wastewater, and the inability to completely shut down the station for repair work. Risk analysis methods are presented, including pipeline condition diagnostics and structural strength calculations. The work contains proof of the equation of pipeline strength under internal pressure and demonstrates the practical application of a risk-based approach in the operation of wastewater facilities. The obtained results can be used to improve reliability and prevent emergencies at similar facilities.

Keywords: technosphere safety, sewage pumping station, risk-based approach, emergency situations, pipeline, hydraulic calculation, environmental safety.

Введение

Обеспечение техносферной безопасности является одной из ключевых задач в сфере жизнеобеспечения городов [1], [2]. Системы водоотведения, в частности канализационные насосные станции (КНС), играют важную роль в сохранении санитарно-эпидемиологического благополучия населённых пунктов. Однако длительная эксплуатация оборудования, воздействие агрессивной среды и отсутствие возможности полной остановки станции приводят к увеличению риска возникновения аварийных ситуаций.

Главной насосной станцией (ГНС) города Хабаровска ежедневно перекачивается около 195 тыс. м³ сточных вод. При этом всасывающие трубопроводы насосных агрегатов находятся в неудовлетворительном состоянии, что связано с их физическим износом, коррозией и абразивным воздействием содержащихся в стоках твёрдых частиц. Согласно нормативным документам (СП 32.13330.2012, ГОСТ 27751–2014 и др.), такие объекты должны эксплуатироваться с учётом требований надёжности и безопасности, однако текущее состояние трубопроводов не соответствует этим стандартам.

Актуальность работы обусловлена необходимостью внедрения современных подходов к управлению рисками на объектах коммунальной инфраструктуры [3]. Особенно важно это в условиях, когда любые аварии на КНС могут привести к массовому загрязнению окружающей среды, ухудшению эпидемиологической обстановки и нарушению жизнеобеспечения населения.

Целью данной работы является разработка риск-ориентированного подхода [1] к обеспечению безопасности канализационных насосных станций на основе анализа технического состояния оборудования, моделирования аварийных сценариев и выполнения расчётной оценки прочности трубопроводов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ состояния трубопроводов и оборудования ГНС.

2. Выявить факторы, влияющие на уровень техносферной безопасности.
3. Выполнить оценку остаточной прочности трубопровода расчетным методом.
4. Предложить рекомендации по минимизации рисков и повышению надёжности системы.

Исследовательская часть

2.1. Характеристика объекта исследования

Главной насосной станцией (ГНС) города Хабаровска ежедневно перекачивается около 195 тыс. м³ сточных вод. Трубопроводы выполнены из стали, имеют диаметр от 1400 мм до 1200 мм и находятся в канале под полом машинного отделения. По данным обследования, износ стенок труб достигает 65%, местами толщина составляет менее 3 мм, что ниже минимально допустимой величины согласно СП 33.13330.2012 (Черт. 1, Рис. 1).

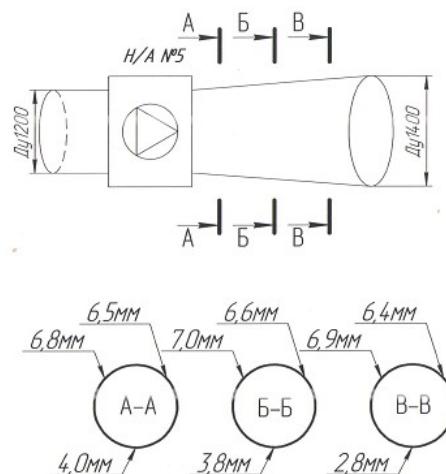


Рисунок 1 - Чертёж объекта исследования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.77.1>

Далее необходимо рассмотреть факторы, влияющие на прочность канализационных трубопроводов.

Трубопроводы насосных станций подвергаются воздействию внутреннего давления, возникающего при перекачивании сточных вод. Давление зависит от напора насосов, гидравлического сопротивления труб и высоты подъема стоков.

Даже при допустимых значениях давления, снижение толщины стенки из-за износа или коррозии может привести к превышению допустимых напряжений.



Рисунок 2 - Стенка трубопровода
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.77.2>

Канализационные стоки содержат химически агрессивные компоненты: сероводород (H_2S), органические кислоты, хлориды, сульфаты и другие вещества. В условиях высокой влажности и температуры создаются идеальные условия для электрохимической и химической коррозии металлических труб [4].

Коррозия приводит к уменьшению толщины стенки труб, что напрямую снижает их несущую способность [5], [6].

По данным натурных исследований ГНС г. Хабаровска, остаточная толщина стенок труб снизилась до 2,8 мм (изначально 10 мм), то есть на 72%.

Кроме того, канализационные стоки содержат механические примеси: песок, глину, частицы шлака, строительного мусора и других твёрдых включений. При движении потока эти частицы воздействуют на внутреннюю поверхность труб, вызывая их износ.

Механизм износа при этом следующий:

- Ударное воздействие частиц при высокой скорости потока.
- Трение между частицами и внутренней поверхностью трубы.
- Локальное разрушение защитного слоя (например, антакоррозионного покрытия).

Абразивный износ наиболее интенсивен в местах изменения направления потока (отводы, тройники, входы в насосы), а также в нижней части трубопроводов, где концентрируются тяжёлые частицы.

Абразивный износ приводит к локальному истончению стенок труб, особенно в зонах с высокой скоростью потока. Это снижает устойчивость труб к внутреннему давлению и увеличивает вероятность образования трещин и свищей.

По результатам натурного обследования ГНС, абразивный износ в сочетании с коррозией стал одной из основных причин снижения толщины стенок труб до критических значений.

Подземные трубопроводы также подвержены воздействию давления грунта, транспортных нагрузок и веса строительных конструкций (например, перекрытий насосной станции) [7], [8].

Внешние нагрузки вызывают изгибающие напряжения и сжатие труб. Особенно опасно неравномерное распределение нагрузки, например, при просадке грунта или некачественной обратной засыпке.

Рассчитываются по СП 42.13330 — нагрузки на подземные трубопроводы, с учетом глубины заложения, типа грунта и транспортной нагрузки.

Канализационные трубопроводы подвержены температурным колебаниям как внешней среды, так и перекачиваемых стоков. Например, в холодное время года температура может опускаться до $0^{\circ}C$, а летом — повышаться до $+30^{\circ}C$ и выше.

В реальных условиях все перечисленные факторы действуют одновременно, что приводит к ускоренному разрушению трубопроводов.

2.2. Моделирование уравнения прочности трубопровода

Исходные данные:

Диаметр трубопровода: $D = 1200 \text{ мм} = 1,2 \text{ м}$.

Минимальная толщина стенки: $t = 2,8 \text{ мм} = 0,0028 \text{ м}$.

Внутреннее давление: $p = 0,2 \text{ Мпа}$.

Материал трубы: сталь ВСт3, $\alpha_{\text{доп}} = 140 \text{ Мпа}$.

Формула для цилиндрической оболочки:

$$\alpha = \frac{p \cdot D}{2 \cdot t}$$

Подставляем значения:

$$\alpha = \frac{0,2 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,0028} = \frac{0,24}{0,0056} = 42,86 \text{ Мпа}$$

Сравнение с допустимым напряжением:

$\alpha = 42,86 \text{ Мпа} < \alpha_{\text{доп}} = 140 \text{ Мпа} \rightarrow$ по прочности труба выдерживает.

Однако износ стенок трубопровода достигает 65%, локально $t < 3 \text{ мм}$, что противоречит требованиям СП 33.13330.2012.

Введем коэффициент износа: $k = 0,65$ (65%).

Тогда эффективная толщина: $t_{\text{эфф}} = t \cdot (1-k) = 0,0028 \cdot (1-0,65) = 0,0010 \text{ м} = 1 \text{ мм}$.

Пересчитаем напряжение:

$$\alpha = \frac{0,2 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,001} = \frac{0,24}{0,002} = 120 \text{ Мпа}$$

$\alpha = 120 \text{ Мпа} < \alpha_{\text{доп}} = 140 \text{ Мпа} \rightarrow$ получаем граничное состояние

При дальнейшем увеличении износа или повышении давления возможно разрушение трубопровода.

Расчёт показал, что при номинальной толщине стенки трубопровод соответствует условиям прочности.

Однако с учетом фактического износа (до 65%) напряжения в стенке трубопровода достигают 120 Мпа — близко к предельным значениям.

Необходимо провести модернизацию трубопроводов, использовать защитные покрытия и внедрить систему мониторинга технического состояния.

Предложенный подход может быть использован для других объектов водоотведения с аналогичными проблемами.

Оценка и классификация рисков канализационной насосной станции:

Для систематизации выявленных угроз и обоснования риска-ориентированного подхода применена матрица оценки рисков, основанная на анализе двух ключевых параметров:

1. Вероятность возникновения события — оценивается по шкале от 1 (очень низкая) до 5 (очень высокая).
2. Тяжесть последствий — оценивается по шкале от 1 (незначительные) до 5 (катастрофические).

Уровень риска определяется произведением этих двух параметров:

• Риск = Вероятность \times Тяжесть последствий.

Классификация уровня риска:

- Низкий риск (1–5 баллов): Допустимое состояние, требуется плановое обслуживание.
- Средний риск (6–12 баллов): требуется усиленный контроль и планирование работ.
- Высокий риск (13–20 баллов): требуется срочное вмешательство.

Недопустимый риск (21–25 баллов): риск неприемлем, необходимо немедленное действие.

Таблица 1 - Матрица оценки рисков канализационной насосной станции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.77.3>

№	Источник риска	Вероятность (1–5)	Тяжесть последствий (1–5)	Уровень риска	Классификация	Описание последствий
1	Разрыв/свищ напорного коллектора вследствие коррозии и износа	5	5	25	Недопустимый	Полная остановка ГНС, выброс неочищенных стоков в окружающую среду, загрязнение почвы и поверхностных вод, эпидемиологическая угроза
2	Локальное разрушение участков трубопровода из-за абразивного износа	4	4	16	Высокий	Уменьшение пропускной способности, риск дальнейшего распространения разрушений, увеличение гидравлического сопротивления
3	Превышение допустимых напряжений в стенке трубопровода при повышении давления	4	4	16	Высокий	Возможность хрупкого разрушения, особенно в условиях температурных колебаний и циклических нагрузок
4	Образование внутренних отложений и биообрастаний, снижающих сечение	5	3	15	Высокий	Снижение пропускной способности, рост давления в системе,

№	Источник риска	Вероятность (1–5)	Тяжесть последствий (1–5)	Уровень риска	Классификация	Описание последствий
	трубы					увеличение нагрузок на оборудование, риск пробок
5	Электрохимическая коррозия в местах контакта с грунтовыми водами	4	3	12	Средний	Ускоренное истончение стенок труб, необходимость интенсивного мониторинга и замены участков
6	Воздействие внешних нагрузок (давление грунта, транспортные нагрузки, просадки)	3	3	9	Средний	Локальные деформации, риск смятия труб на отдельных участках, трещины в сварных швах
7	Отказ или неправильная работа датчиков давления и системы контроля	3	4	12	Средний	Несвоевременное обнаружение критических ситуаций, неправильное управление нагрузками, увеличение риска аварии
8	Отказ насосных агрегатов при перегрузке (следствие снижения пропускной способности трубопровода)	3	3	9	Средний	Временная остановка откачки, гидравлический удар при восстановлении работы, возможное затопление камер насосной станции
9	Человеческий фактор: неправильная эксплуатация, ненадлежащее	3	4	12	Средний	Ускоренный износ оборудования, пропуск необходимых

№	Источник риска	Вероятность (1–5)	Тяжесть последствий (1–5)	Уровень риска	Классификация	Описание последствий
	обслуживание					профилактических работ, увеличение вероятности аварии
10	Комбинированное воздействие коррозии, абразива и механических нагрузок	5	5	25	Недопустимый	Синергетическое ускорение разрушения, непредсказуемый характер развития аварии, высокие риски для персонала и окружающей среды

Анализ результатов матрицы:

Проведённая оценка выявила две группы критических рисков.

Недопустимые риски (25 баллов):

Риск 1 (Разрыв напорного коллектора) и Риск 10 (Синергетическое воздействие факторов) достигают максимального уровня 25 баллов и требуют немедленного вмешательства. Опасность заключается в том, что при современном состоянии трубопроводов ГНС г. Хабаровска граничные напряжения (120 МПа при допуске 140 МПа) находятся на уровне 85,7% от предельного значения. Любое увеличение давления, локальное скопление коррозионных разрушений или гидравлический удар могут вызвать катастрофический отказ. Последствия включают полную остановку водоотведения, выброс 195 тыс. м³ неочищенных стоков в Амур, загрязнение окружающей среды и эпидемиологическую угрозу для населения.

Высокие риски (13–20 баллов):

Четыре риска классифицированы как высокие (16 и 15 баллов). Это означает, что даже без немедленной катастрофы система функционирует в режиме деградации. Локальные разрушения, образование отложений и превышение критических напряжений создают условия для постепенного развития критической ситуации. При отсутствии активного мониторинга и профилактических мер переход от высокого к недопустимому риску может произойти в течение одного-двух сезонов эксплуатации.

Средние риски (6–12 баллов):

Средние риски (связанные с электрохимической коррозией, отказом датчиков, человеческим фактором и нагрузками) требуют усиленного контроля, регулярного обслуживания и обучения персонала. Хотя они менее критичны, их совокупность может способствовать ускорению перехода высоких рисков в недопустимые.

Таким образом, матрица оценки рисков демонстрирует, что канализационная насосная станция г. Хабаровска находится в состоянии критического риска, требующем немедленного применения риск-ориентированного подхода к управлению. Традиционная система планово-предупредительного обслуживания недостаточна для обеспечения техносферной безопасности при такой совокупности факторов.

Рекомендации по минимизации рисков и повышению надёжности системы

На основе проведённого анализа и расчётов, а также данных, полученных в ходе натурного исследования на ГНС г. Хабаровска, предлагается следующий комплекс мер:

Провести полную замену наиболее изношенных участков трубопроводов.

Для временного решения — установка металлических обойм на участках с минимальной толщиной стенки. Использовать коррозионностойкие материалы (нержавеющая сталь, полиэтиленовые трубы высокой плотности HDPE).

Установить датчики давления, температуры и вибрации для оперативного контроля состояния трубопроводов. Внедрить систему диагностики методом ультразвукового контроля (УЗК) и вихревых токов. Организовать регулярные инспекции с использованием видео зондов.

Нанесение антикоррозионных покрытий (например, эпоксидные смолы, полиуретановые покрытия). Обеспечение защиты внутренних поверхностей труб от абразивного износа путём нанесения керамических слоёв или футеровки.

Регулирование подачи сточных вод для снижения пульсаций давления.

Внедрение частотного регулирования насосов для мягкого пуска и равномерной нагрузки на трубопроводы. Обеспечение аварийного перепуска воды при выходе из строя одного из насосов.

Создание модели прогнозирования аварийных ситуаций с оценкой вероятности возникновения и последствий. Разработка инструкций по локализации аварий и минимизации экологического ущерба. Обучение персонала действиям в чрезвычайных ситуациях [8], [9], [10].

Обсуждение и выводы

Проведённый анализ технического состояния главной насосной станции (ГНС) города Хабаровска показал, что трубопроводы, несмотря на их кажущееся соответствие нормативным требованиям по прочности, находятся в предаварийном состоянии. Основными факторами, снижающими надёжность системы, являются:

Физический износ, достигающий 65%, коррозионное воздействие агрессивной среды, вызванное наличием сероводорода, органических кислот и солей, абразивный износ частицами взвеси, особенно в местах изменения направления потока, внешние нагрузки от грунта и строительных конструкций, температурные колебания, способствующие усталости материала.

Расчёты, выполненные на основе формулы прочности цилиндрической оболочки, показали, что при номинальной толщине стенки трубопровод выдерживает внутреннее давление. Однако при учёте фактического износа (до 1 мм), напряжения в стенке достигают 120 МПа, что составляет 85.7% от допустимого значения для стали ВСт3. Это указывает на то, что трубопровод находится в граничном состоянии, и любое увеличение нагрузки или ухудшение условий эксплуатации может привести к аварии.

Анализ аварийных сценариев показал, что невозможность полной остановки станции для замены трубопроводов значительно усложняет проведение ремонтных работ и повышает вероятность возникновения ЧС. В случае аварии на ГНС, перекачивающей 195 тыс. м³ сточных вод в сутки, при этом возможны, как массовое загрязнение окружающей среды, так и ухудшение эпидемиологической обстановки, и нарушение жизнеобеспечения населения.

Таким образом, традиционный подход к техническому обслуживанию трубопроводов, основанный на планово-предупредительных работах, недостаточен. Для обеспечения техносферной безопасности необходим переход к риск-ориентированному подходу, позволяющему прогнозировать и минимизировать вероятность аварий.

Анализ технического состояния ГНС г. Хабаровска выявил значительный износ трубопроводов (до 65%), что приводит к снижению их прочности и увеличению риска возникновения аварий.

Основными причинами износа трубопроводов являются коррозия, абразивный износ, воздействие внешних нагрузок и температурных колебаний.

Расчёт прочности трубопроводов показал, что при номинальной толщине стенок трубы выдерживает внутреннее давление. Однако с учётом износа напряжения в стенке достигают 120 МПа — граничное состояние, близкое к предельному.

Риск-ориентированный подход позволяет учитывать не только текущее состояние оборудования, но и вероятность возникновения аварий, последствия инцидентов и необходимость оперативного реагирования.

Рекомендации по модернизации системы включают в себя:

- Замену наиболее изношенных участков трубопроводов.
- Использование коррозионностойких и износостойких материалов.
- Внедрение систем мониторинга и диагностики.
- Нанесение защитных покрытий.
- Разработку модели прогнозирования аварийных ситуаций и обучение персонала.

Предложенный подход может быть применён к другим объектам водоотведения, особенно в регионах с аналогичными климатическими и эксплуатационными условиями.

Заключение

Техносферная безопасность объектов водоотведения, включая канализационные насосные станции, является важнейшим аспектом устойчивого развития городских территорий. Главная насосная станция города Хабаровска, перекачивающая ежедневно около 195 тыс. м³ сточных вод, находится в предаварийном состоянии, что требует немедленного вмешательства. На основе проведённого исследования разработан риск-ориентированный подход, включающий диагностику технического состояния трубопроводов, моделирование аварийных ситуаций, гидравлический расчёт прочности, внедрение систем мониторинга и прогнозирования.

Доказано расчетом, что применение данного подхода позволяет повысить надёжность объектов водоотведения, снизить риск возникновения чрезвычайных ситуаций и обеспечить экологическую и санитарно-эпидемиологическую безопасность населённых пунктов. Результаты исследования могут быть использованы при разработке программ модернизации объектов жизнеобеспечения, а также в образовательной и научной деятельности по направлениям техносферной безопасности, экологического инжиниринга и управления природными ресурсами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Клепиков О.В., Воронежский государственный университет, Воронеж Российская Федерация, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.77.4>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Klepikov O.V., Voronezh State University, Voronezh Russian Federation, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.77.4>

Список литературы / References

1. Алексеев М.И. Риск-ориентированный подход к оценке надежности канализационной сети города / М.И. Алексеев, Л.А. Баранов, Ю.А. Ермолин // Вода и экология: проблемы и решения. — 2020. — № 3 (83). — С. 3–7.
2. Шилак П.А. Риск-ориентированный подход к проектированию системы промышленной безопасности: проблемы, решения / П.А. Шилак, А.Ю. Ганшкевич // Теоретические и практические аспекты формирования и развития «новой науки». — 2022. — С. 67–81.
3. Соколов Л.И. Водная безопасность региона / Л.И. Соколов, В.А. Силинский // Управление техносферой. — 2024. — Т. 7. — Вып. 2. — С. 319–337.
4. Матюшкин Д.А. Риск-ориентированный надзор как исключение правовых рисков водопроводно-канализационного хозяйства / Д.А. Матюшкин // Вестник науки. — 2022. — Т. 4. — № 2 (47). — С. 39–48.
5. Болгов М.В. О некоторых вопросах, связанных с прогнозированием чрезвычайных ситуаций, вызванных гидрологическими опасными явлениями и их последствиями / М.В. Болгов, Е.В. Арефьева // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. — 2017. — № 4 (35). — С. 102–110.
6. Perminov N. Modeling And Monitoring Of Structural Safety Of Long-Operating Underground Structures Of The Sewage System In The Conditions Of Increasing Anthropogenic Actions In Order To Provide Sustainable Lifecycle Of Engineering Infrastructure Of The Megacity (The Experience Of St. Petersburg) / N. Perminov, R. Mangushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2022. — Vol. 18. — № 3. — P. 95–113.
7. Masud M.F. Development of a Risk-Based Maintenance (RBM) strategy for sewerage pumping station network / M.F. Masud, G. Chattopadhyay, I. Gunawan // 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). — IEEE, 2019. — P. 455–458.
8. Lantaca J.R. Sewage Treatment Facility Maintenance: A Risk-based Approach for High-rise Residential Property / J.R. Lantaca // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2024. — Vol. 488. — P. 03002.

9. Butler B. Risk management of groundwater pollution: a knowledge-based approach / B. Butler. — Bridget Elizabeth Butler, 1998.
10. Хадам И.Н. Применимость риск-ориентированного управления и необходимость анализа экономических решений с учетом рисков на объектах, загрязненных опасными отходами / И.Н. Хадам, Дж.Дж. Калуараччи // Environment International. — 2003. — Т. 29. — № 4. — С. 503–519.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alekseev M.I. Risk-orientirovannii podkhod k otsenke nadezhnosti kanalizatsionnoi seti goroda [Risk-oriented approach to assessing the reliability of the city sewer network] / M.I. Alekseev, L.A. Baranov, Yu.A. Yermolin // Voda i ekologiya: problemi i resheniya [Water and Ecology: Problems and Solutions]. — 2020. — № 3 (83). — P. 3–7. [in Russian]
2. Shilak P.A. Risk-orientirovannii podkhod k proektirovaniyu sistemi promishlennoi bezopasnosti: problemi, resheniya [Risk-Oriented Approach To The Design Of An Industrial Safety System: Problems, Solutions] / P.A. Shilak, A.Yu. Ganshkevich // Teoreticheskie i prakticheskie aspekti formirovaniya i razvitiya «novoi nauki» [Theoretical and Practical Aspects of the Formation and Development of "New Science"]. — 2022. — P. 67–81. [in Russian]
3. Sokolov L.I. Vodnaya bezopasnost regiona [Water Security Of The Region] / L.I. Sokolov, V.A. Silinskii // Upravlenie tekhnosferoi [Technosphere Management]. — 2024. — Vol. 7. — Iss. 2. — P. 319–337. [in Russian]
4. Matyushkin D.A. Risk-orientirovannii nadzor kak isklyuchenie pravovikh riskov vodoprovodno-kanalizatsionnogo khozyaistva [Risk-Oriented Supervision As The Elimination Of Legal Risks Of Water And Sewage Services] / D.A. Matyushkin // Vestnik nauki [Science Bulletin]. — 2022. — Vol. 4. — № 2 (47). — P. 39–48. [in Russian]
5. Bolgov M.V. O nekotorikh voprosakh, svyazannikh s prognozirovaniem chrezvichainikh situatsii, vizvannikh gidrologicheskimi opasnymi yavleniyami i ikh posledstviyami [On some issues related to forecasting emergencies caused by hydrological hazardous phenomena and their consequences] / M.V. Bolgov, Ye.V. Arefeva // Nauchnie i obrazovatelnie problemi grazhdanskoi zashchiti [Scientific and Educational Problems of Civil Protection]. — 2017. — № 4 (35). — P. 102–110. [in Russian]
6. Perminov N. Modeling And Monitoring Of Structural Safety Of Long-Operating Underground Structures Of The Sewage System In The Conditions Of Increasing Anthropogenic Actions In Order To Provide Sustainable Lifecycle Of Engineering Infrastructure Of The Megacity (The Experience Of St. Petersburg) / N. Perminov, R. Mangushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2022. — Vol. 18. — № 3. — P. 95–113.
7. Masud M.F. Development of a Risk-Based Maintenance (RBM) strategy for sewerage pumping station network / M.F. Masud, G. Chattopadhyay, I. Gunawan // 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). — IEEE, 2019. — P. 455–458.
8. Lantaca J.R. Sewage Treatment Facility Maintenance: A Risk-based Approach for High-rise Residential Property / J.R. Lantaca // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2024. — Vol. 488. — P. 03002.
9. Butler B. Risk management of groundwater pollution: a knowledge-based approach / B. Butler. — Bridget Elizabeth Butler, 1998.
10. Khadam I.N. Primenimost risk-orientirovannogo upravleniya i neobkhodimost analiza ekonomicheskikh reshenii s uchetom riskov na obektakh, zagryaznennikh opasnymi otkhodami [Applicability of risk-based management and the need for risk-based economic decision analysis at hazardous waste contaminated sites] / I.N. Khadam, Dzh.Dzh. Kaluarachchi // Environment International [Environment International]. — 2003. — Vol. 29. — № 4. — P. 503–519. [in Russian]