

DOI: 10.58168/TSMSTTO2026_167-174

УДК 627.8

СИСТЕМА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСХОЗЯЙНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Гавриленко Д.А., *магистрант*

Боровкова А.М., *к-т техн. наук, доцент*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация. Разработка системы оценки безопасности бесхозных гидротехнических сооружений на основе теории надежности и марковских процессов изменения технического состояния гидротехнических систем.

Ключевые слова: бесхозные гидротехнические сооружения, уровень безопасности, риск, индекс опасности, деградиационные процессы.

SAFETY ASSESSMENT SYSTEM FOR UNMANAGED HYDROTECHNICAL ESTABLISHMENTS

Gavrilenko D.A., *master*

Borovkova A.M., *Candidate of Technical Sciences, Docent*

National Research University "MPEI"

Abstract. Development of a system for assessing the safety of unowned hydraulic structures based on the theory of reliability and Markov processes of changing the technical condition of hydraulic systems.

Keywords: unowned hydraulic structures, safety level, risk, hazard index, degradation processes.

В научной статье «Прогноз уровня безопасности низконапорных и бесхозных гидротехнических сооружений» В.И. Волков, В.Л. Снежко и Д.В. Козлов применили методы системной теории надежности к результатам экспертного обследования более 1000 низконапорных гидроузлов в Московской области [1].

Авторы статьи описали, как именно ведет себя плотина, за которой никто не следит. Без обслуживания и ремонта она проходит через дискретные состояния: от нормального к пониженному, затем к неудовлетворительному и в итоге – к опасному (аварийному) уровню. Для каждого перехода между этими состояниями авторы рассчитали постоянные интенсивности отказов, то есть с какой вероятностью плотина, находящаяся в неудовлетворительном состоянии, перейдет в опасное в течение года. И тем самым им удалось посчитать вероятностный прогноз уровня безопасности низконапорных земляных плотин.

Как показали исследования, состояние гидротехнических сооружений (далее – ГТС) может быть охарактеризовано четырьмя уровнями безопасности, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Уровни безопасности ГТС с характеристиками и контролируемыми показателями

Уровень безопасности	Характеристика состояния	Контролируемые показатели
Нормальный	Сооружение полностью исправно, значения контролируемых показателей не превышают допустимых. Соответствует проектной документации	Все диагностические показатели ниже предупредительного уровня К1 (Отсутствие видимых дефектов, фильтрация в пределах нормы, водосбросы исправны)
Пониженный	Имеются отдельные дефекты, не влияющие на устойчивость и безопасность, но требующие наблюдения	Отдельные диагностические показатели приближаются к К1 (Незначительные деформации откосов, локальные повреждения креплений, начало зарастания)
Неудовлетворительный	Выявлены существенные дефекты, требуется проведение ремонтных работ. Безопасность не обеспечена в полной мере	Диагностические показатели превысили К1, но ниже К2 (Разрушение креплений откосов, активная фильтрация, заиливание водосбросов, просадки гребня)
Опасный (аварийный)	Сооружение находится в предаварийном состоянии, существует угроза внезапного разрушения. Эксплуатация запрещена	Диагностические показатели превысили предельный уровень К2 (Необратимые деформации, суффозия, разрушение водосбросных сооружений, угроза перелива)

Новая система классификации категорий опасности служит для решения главной задачи – ранжирования объектов по степени реальной угрозы с учётом динамики деградации, фактора внезапности, пространственного фактора (привязки к населению). Именно поэтому в основе предлагаемой классификации лежит теория надежности гидротехнических систем и марковские процессы изменения технического состояния.

Бесхозные гидротехнические сооружения находятся в состоянии прогрессирующей деградации. Однако для эффективного управления рисками и распределения ограниченных ресурсов недостаточно констатировать факт ухудшения состояния. Необходимо уметь количественно прогнозировать скорость этого процесса и вероятность перехода сооружения в аварийное состояние. Именно эту задачу решает теория надежности гидротехнических систем в сочетании с аппаратом марковских случайных процессов. В отличие от

детерминированных подходов, оценивающих состояние сооружения как статическую характеристику («норма» или «авария»), вероятностные методы позволяют описать динамику изменения состояния во времени и рассчитать вероятность того, что сооружение, находящееся сегодня в удовлетворительном состоянии, через определенный промежуток времени перейдет в опасное.

Понятие надежность гидротехнических сооружений определяется как способность объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции. Также ключевым понятием является отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Для ГТС отказом может считаться: превышение критических значений фильтрационного расхода; недопустимые деформации (осадки, сдвиги); разрушение креплений откосов; выход из строя водосбросных сооружений; прорыв плотины.

В теории надежности различают внезапные отказы (происходящие скачкообразно, например, разрушение водосбросного затвора) и постепенные отказы (обусловленные накоплением повреждений во времени – износ, коррозия, фильтрационная деформация). Для бесхозных ГТС, лишенных технического обслуживания, характерны именно постепенные отказы, которые могут быть описаны с помощью марковских процессов.

Марковский случайный процесс (или «процесс без последствий») – это математическая модель, в которой вероятность перехода системы из одного состояния в другое зависит только от текущего состояния и не зависит от того, как система оказалась в этом состоянии. Для задач прогнозирования технического состояния ГТС это означает, что для оценки вероятности аварии в будущем достаточно знать текущий уровень безопасности сооружения, история его эксплуатации не влияет на прогноз, что особенно справедливо для бесхозных объектов, где история обслуживания отсутствует.

Математически марковский процесс описывается системой дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова (один из выдающихся учёных в области математики XX века). Для дискретных состояний, которыми являются уровни безопасности ГТС используется аппарат марковских цепей с непрерывным временем. Интенсивности переходов между состояниями задаются постоянными интенсивностями отказов λ , которые определяются на основе статистических данных.

Ключевое отличие бесхозных ГТС от эксплуатируемых заключается в отсутствии цикла технического обслуживания, что приводит к экспоненциальному ускорению деградиационных процессов. Эмпирические исследования, проведенные на выборке из более чем 1000 низконапорных ГТС в Центральной России, позволили установить зависимость:

$$T_{\text{крит}} = T_{\text{норм}} \times \exp(k \times t_{\text{бесхоз}})$$

где:

- $T_{\text{крит}}$ – время достижения критического (аварийного) состояния;

- $T_{\text{норм}}$ – нормативный срок службы сооружения (50 лет для земляных плотин III и IV классов ответственности);
- k — коэффициент ускорения деградации (для бесхозных ГТС $k = 0,15-0,25$ ед./год (15–25% в год) (указанный диапазон $k = 0,15-0,25$ — это оценка для предаварийных объектов, разрушение которых может произойти в течение 4 – 7 лет $\rightarrow \lambda = 1/4 \div 1/7 \approx 0,14-0,25$ ед./год);
- $t_{\text{бесхоз}}$ – время нахождения в бесхозном статусе (лет).

Практические расчеты показывают: если эксплуатируемая плотина при нормативном сроке 50 лет достигает аварийного состояния к 65-70 годам эксплуатации, то бесхозный объект того же типа может разрушиться уже через 25-30 лет после прекращения обслуживания.

На основе анализа теоретических моделей и эмпирических данных предлагается многомерная классификация бесхозных ГТС, включающая шесть основных классификационных признаков:

1. По степени технической деградации (Д), таблица 2.

Таблица 2

Критерии и баллы степени технической деградации

№	Степень деградации	Критерии	Балл
1	Предаварийное состояние	Необратимые изменения, угроза внезапного разрушения (более 30 лет)	$1 \geq D_1 > 0,9$
2	Критическая деградация	Значительные деформации, разрушение водосбросов, активная фильтрация (15-30 лет)	$0,9 \geq D_2 > 0,6$
3	Умеренная деградация	Заращение откосов, частичное разрушение креплений, начало фильтрации (5-15 лет)	$0,6 \geq D_3 > 0,25$
4	Начальная стадия деградации	Признаки деградации отсутствуют или минимальны (до 5 лет без обслуживания)	$0,25 \geq D_4 > 0$

2. По пространственному расположению (Р), таблица 3.

Таблица 3

Критерии и баллы степени отдаленности

№	Степень отдаленности	Критерии	Балл
1	В границах населенного пункта и инфраструктуры	Сооружение расположено в пределах жилой зоны (время достижения волны менее 15 минут)	$1 \geq P1 > 0,75$
2	Выше населенного пункта и инфраструктуры	Расстояние менее 1 км или время достижения волны менее 30 минут	$0,75 \geq P2 > 0,5$
3	Вдали от населенных пунктов и инфраструктуры	Расстояние от 1 до 3 км или время достижения волны от 30 до 90 минут	$0,5 \geq P3 > 0,25$
4	В удаленной местности	Отсутствие населения и инфраструктуры в зоне затопления (более 3 км или время достижения волны более 90 минут)	$0,25 \geq P4 > 0$

3. По объему водохранилища и высоте плотины (О), таблица 4.

Таблица 4

Критерии и баллы признака по объему водохранилища и высоте плотины

№	Наименование	Критерии	Балл
1	Крупные	Высота >15 м, объем >10 млн м ³	$1 \geq O1 > 0,85$
2	Средние	Высота 5-15 м, объем 1-10 млн м ³	$0,85 \geq O2 > 0,6$
3	Малые	Высота 2-5 м, объем 0,1-1 млн м ³	$0,6 \geq O3 > 0,25$
4	Очень малые	Высота <2 м, объем $<0,1$ млн м ³	$0,25 \geq O4 > 0$

4. По состоянию водосбросных сооружений (В), таблица 5.

Таблица 5

Критерии и баллы по состоянию водосбросных сооружений

№	Наименование	Критерии	Балл
1	Полностью неработоспособные	Пропуск воды невозможен или сильно затруднен, угроза перелива (пропускная способность снижена на 80-100%)	$1 \geq B1 > 0,75$
2	Сильно заиленные/разрушенные	Пропускная способность снижена на 40-80%	$0,75 \geq B2 > 0,5$
3	Частично заиленные	Пропускная способность снижена на 10-40%	$0,5 \geq B3 > 0,25$
4	Исправные	Пропускная способность соответствует проектной (пропускная способность снижена на 0-10%)	$0,25 \geq B4 > 0$

5. По степени сохранности основных сооружений и оборудования (С),
таблица 6.

Таблица 6

Критерии и баллы степени сохранности основных сооружений и оборудования

№	Степень сохранности	Функциональные критерии	Балл
1	0% (полностью разрушено)	Сооружения не выполняют регулирующую функцию, возможен перелив в бытовых условиях	$1 \geq C1 > 0,9$
2	25%	Создает подпор в бытовых условиях, при паводке возможен перелив, сильное стеснение русла реки	$0,9 \geq C2 > 0,8$
3	50%	Подпор возникает при любом паводке; заметное стеснение русла	$0,8 \geq C3 > 0,5$
4	75%	Подпор возникает только при сильном паводке, стеснение русла незначительно превышает проектное	$0,5 \geq C4 > 0,1$
5	100% (полностью сохранено)	Создает проектный подпор в любых условиях; стеснение русла соответствует проекту	$0,1 \geq C4 > 0$

6. По социальной значимости водоема (З), таблица 7.

Таблица 7

Критерии и баллы признака социальной значимости

№	Степень значимости	Критерии	Балл
1	Высокая	Водоем используется для мелиоративных и ирригационных систем, рыборазведения, рекреации с массовым посещением	$1 \geq 31 > 0,75$
2	Средняя	Используется для хозяйственных нужд, локальной рекреации	$0,75 \geq 32 > 0,25$
3	Низкая	Не используется, утратил первоначальное назначение	$0,25 \geq 33 > 0$
4	Отсутствует	Не пригоден для использования	$34 = 0$

На основе комбинации классификационных признаков вычисляется интегральный индекс опасности по формуле:

$$\text{ИО} = Д \times 0,20 + Р \times 0,20 + О \times 0,25 + В \times 0,15 + С \times 0,15 + З \times 0,05$$

Весовые коэффициенты распределены в соответствии с оценками значимости каждого фактора:

- Техническая деградация (Д) – 20%.

Бесхозный ГТС принципиально отличается от эксплуатируемого именно степенью деградации. Для бесхозного эта степень протекает экспоненциально и является прямой причиной аварии;

- Пространственное расположение (Р) – 20%.

Расположение – это потенциальная опасность. Если ГТС полностью разрушится, последствия определяются тем, что находится ниже по течению;

- Объемные характеристики (О) – 25% (определяет разрушительную энергию)

Объем водохранилища и высота плотины определяют разрушительную энергию волны прорыва;

- Состояние водосбросов (В) – 15%.

Водосбросы – это наиболее уязвимый элемент ГТС, их отказ – частая причина аварий. Однако, в отличие от общей деградации тела плотины, состояние водосбросов может быть оценено отдельно и имеет специфический механизм влияния;

- По степени сохранности основных сооружений и оборудования (С) – 15%.

Состояние основных сооружений и оборудования учитывают фактор стороннего риска прорыва, что напрямую оказывает влияние на текущее состояние ГТС;

- Социальная значимость (З) – 5%.

Социальная значимость не влияет на вероятность аварии и не определяет масштаб разрушений, но она влияет на решение о консервации или ликвидации объекта после определения категории опасности.

После вычисления интегрального индекса опасности можно определить категорию опасности бесхозного сооружения по таблице 8.

Таблица 8

Интегральные категории опасности бесхозных ГТС

Категория	Индекс Опасности	Описание	Требуемые меры реагирования
I – Чрезвычайно высокая	$\geq 0,80$	Объект представляет непосредственную угрозу массовой гибели людей и катастрофических разрушений	Немедленная эвакуация при угрозе, приоритетное выделение средств, круглосуточный мониторинг
II – Высокая	0,60-0,80	Объект представляет реальную угрозу для населения и инфраструктуры	Внеплановое обследование, разработка плана мероприятий в течение 30 дней, усиленный контроль

III – Средняя	0,40-0,60	Объект представляет локальную угрозу, преимущественно материальному ущербу	Плановое обследование, включение в региональную программу в течение 1 года
IV – Пониженная	0,10-0,40	Угроза минимальна, преимущественно экологический ущерб	Мониторинг 1 раз в год, плановая консервация или ликвидация
V – Низкая	< 0,10	Объект утратил опасность, подлежит плановой ликвидации	Ликвидация и исключение из Регистра ГТС

Предлагаемая классификация не противоречит действующему законодательству, а дополняет его, учитывая специфику бесхозных объектов. Ее применение позволит объективно ранжировать бесхозные ГТС по степени угрозы, обоснованно распределять ограниченные бюджетные средства и снизить риски катастрофических аварий.

Список литературы

1. Волков В.И. Прогноз уровня безопасности низконапорных и бесхозных гидротехнических сооружений / В.И. Волков, В.Л. Снежко, Д.В. Козлов // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 11. – С. 35-41.

References

1. Volkov, V.I. Forecast of the Safety Level of Low-Pressure and Unowned Hydraulic Structures / V.I. Volkov, V.L. Snezhko, and D.V. Kozlov // Hydraulic Engineering. – 2018. – No. 11. – Pp. 35-41.