



УДК 627.41: 519.242

doi: 10.55287/22275398_2026_60_39

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОГО ВРЕДА ДЛЯ БЕЗНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

И. Р. Лесников
А. Е. Качаев

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»,
г. Коломна

Аннотация

В публикации исследования выполнен системный анализ ограничений методики Ростехнадзора № 347 применительно к безнапорным берегоукрепительным сооружениям IV класса опасности. Показано, что сценарный аппарат методики ориентирован на сооружения с напорным фронтом и образованием волны прорыва, что физически нереализуемо для безнапорных сооружений. Обоснован альтернативный перечень из 11 аварийных сценариев, сгруппированных по генезису отказов (гидрологические, геомеханические, сейсмические, техногенные). Предложен модифицированный индексный метод оценки состояния сооружения с расчетом интегрального коэффициента $K_{\text{комб}}$, учитывающего совместное воздействие гидрологических, геомеханических и сейсмических факторов. Определены пороговые значения коэффициентов и разработаны рекомендации по интерпретации результатов для практического применения. Результаты могут быть использованы при совершенствовании нормативно-правовой базы и в практике эксплуатации безнапорных гидротехнических сооружений IV класса опасности.

Ключевые слова

Берегоукрепительные сооружения, безнапорные гидротехнические сооружения, класс опасности, методика, сценарии аварий, геомеханический отказ, оценка риска, природно-техногенные воздействия.

Дата поступления в редакцию
09.09.2026

Дата принятия к печати
11.09.2026

Введение

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) является одной из приоритетных задач в сфере промышленной безопасности Российской Федерации. Действующая нормативно-правовая база, в частности Методика определения размера максимального вреда при аварии гидротехнического сооружения, утвержденная приказом Ростехнадзора от 15.11.2024 № 347 [1], ориентирована преимущественно на напорные ГТС. Однако значительная часть берегозащитных и берегоукрепительных сооружений, особенно IV класса опасности, являются безнапорными и не создают напорного фронта, способного генерировать волну прорыва [2–4].

Аварии на таких сооружениях носят преимущественно геомеханический характер — оползни, размывы, деформации конструктивных элементов, суффозионные процессы, — однако сценарный аппарат [1] не предусматривает таких аварийных сценариев. Это порождает системную проблему: формальное применение Методики [1] к безнапорным сооружениям либо невозможно, либо дает некорректные результаты, что создает правовую и методологическую неопределенность для эксплуатирующих организаций и надзорных органов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью научного обоснования альтернативных подходов к оценке риска аварий для безнапорных сооружений, учитывающих их конструктивные и режимные особенности водного объекта, с которым они взаимодействуют.

Вопросы оценки риска аварий гидротехнических сооружений активно разрабатываются как в отечественной, так и в зарубежной науке. В работах Щедрина В. Н. [5] рассматриваются вопросы обеспечения безопасности и надежности низконапорных ГТС, включая методы оценки вероятности разрушения участков каналов и насыпей, что близко к тематике безнапорных берегоукреплений. Ляпичев Ю. П. [6] представил методику анализа и оценки риска аварий гидросооружений с практическим опытом ее применения в РФ, однако его подход также ориентирован на напорные сооружения. Курбанов С. О. и др. [7] провели анализ природных и техногенных факторов внешнего воздействия на ГТС, что релевантно для учета половодья, осадков и сейсмики.

В зарубежной литературе значительный интерес представляют работы по оценке устойчивости береговых укреплений и набережных при гидрологических и сейсмических воздействиях. Исследования авторов [8] посвящены основанному на риске обслуживанию и инспекции речных систем защиты от наводнений, где анализируется влияние шоковых деградационных процессов (включая повреждения от паводковых вод) на надежность систем. Kurihara O. [9] исследовал процессы разрушения и конечное состояние составных волноломов с усиливающими насыпями с использованием центробежного моделирования, выявив механизмы опрокидывания и скольжения кессонов. Работы по разрушению гибких защитных матрасов на берегах рек при водном размыве [10] представляют физические модели разрушения, где также применяются методы численного моделирования.

В отечественной практике имеются примеры анализа отказов берегоукрепительных сооружений, в частности, исследования по оптимизации ремонта и усиления подпорных стенок причалов и моделирование устойчивости набережных при оползневых процессах. Однако системный анализ ограничений Методики [1] применительно к безнапорным берегоукрепительным сооружениям IV класса опасности, а также обоснование альтернативных сценариев аварий с учетом геомеханических процессов, половодья, дождевых и снеговых осадков и сейсмической активности в доступной литературе отсутствуют, что подтверждает научную новизну настоящего исследования.

Научная новизна работы заключается в системном анализе ограничений сценарного аппарата Методики [1] Ростехнадзора применительно к безнапорным берегоукрепительным сооружениям IV класса опасности и в обосновании альтернативных аварийных сценариев, учитывающих геомеханические процессы, гидрологические воздействия (половодье, дождевые осадки, снеготаяние) и сейсмическую активность.

Цель исследования - провести системный анализ ограничений Методики Ростехнадзора № 347 применительно к безнапорным берегозащитным и берегоукрепительным сооружениям IV класса опасности и обосновать альтернативный перечень сценариев аварий, учитывающих геомеханические отказы, гидрологические воздействия (половодье, дождевые и снеговые осадки) и сейсмическую активность территории, для последующей адаптации риск-ориентированного подхода к данному классу сооружений.

Методы исследования. Проведен системный анализ нормативно-правовой базы в области промышленной безопасности ГТС, включая Методику [1], [11-12], а также научно-технической литературы по

вопросам оценки риска аварий берегоукрепительных сооружений. Выполнен сравнительный анализ сценарных деревьев, заложенных в Методике [1], с реальными механизмами отказов безнапорных берегоукрепительных сооружений IV класса опасности.

Для количественной оценки вероятностей отказов применен аппарат теории вероятностей с построением деревьев событий и деревьев отказов. На основе анализа статистических данных об отказах аналогичных сооружений и результатов численного моделирования определены вероятности реализации предложенных сценариев аварий.

Выполнен анализ данных натурных наблюдений за деформациями берегоукрепительных сооружений (геодезические измерения, визуальные обследования), а также лабораторные определения физико-механических свойств грунтов основания и тела сооружения (гранулометрический состав, угол внутреннего трения, сцепление, коэффициент фильтрации).

Основная часть

Основная проблема, поднимаемая в данной работе, заключается в системном несоответствии сценарного аппарата Методики [1] особенностям безнапорных берегозащитных сооружений IV класса опасности. Это несоответствие проявляется в следующих аспектах:

Отсутствие в методике сценариев аварий, связанных с геомеханическими отказами (оползни, размывы, суффозия).

Невозможность корректной оценки ущерба, поскольку все расчетные формулы методики завязаны на волну прорыва и затопление территории.

Правовая неопределенность для эксплуатирующих организаций при декларировании безопасности таких сооружений.

Современные подходы к анализу риска аварий гидротехнических сооружений, как отмечается в работах, развиваются в двух направлениях: детерминированном (индексном) и вероятностном. Детерминированные методики используют индексы состояния сооружения с применением методов нечеткой логики для объединения количественной и качественной информации о повреждениях. Вероятностный подход предполагает построение деревьев событий и оценку частоты реализации различных сценариев аварий.

Существующие методики, включая РД 153-34.2-002-01 [13] и методику ФГУП РосНИИВХ [14], имеют ряд ограничений для применения к берегоукрепительным сооружениям (БУС) низкого класса опасности:

- 1) Основной расчетный сценарий предполагает разрушение напорного фронта с образованием бреши и волны прорыва, что нехарактерно для берегоукреплений;
- 2) Методика [1] ориентирована на стоимостную оценку вреда жизни, здоровью и имуществу, тогда как для БУС низкого класса опасности основной ущерб имеет экологический и инфраструктурный характер;
- 3) Половодье, дождевые паводки, сейсмическая активность рассматриваются фрагментарно, без системной увязки со сценариями аварийных ситуаций.

Предлагаемая адаптация Методики [1] для БУС низкого класса опасности базируется на формировании расширенного перечня аварийных сценариев, учитывающих специфику берегоукреплений; расчет среднегодовой вероятности отказа с использованием модифицированного индекса состояния; интегральной оценке влияния гидрологических, сейсмических и техногенных воздействий; включении оценки экологического ущерба наряду с прямыми материальными издержками.

Результаты

В результате проведенного системного анализа Методики [1] установлено, что ее сценарный аппарат полностью ориентирован на напорные гидротехнические сооружения, аварии которых сопровождаются образованием волны прорыва. Для безнапорных берегоукрепительных сооружений IV класса опасности все сценарии, заложенные в Методике [1] (прорыв напорного фронта, разрушение затворов, образование прорана в теле плотины), физически нереализуемы. Это подтверждает системную неприменимость Методики [1] к данному классу сооружений [15].

На основе анализа конструктивных особенностей берегоукрепительных сооружений и природных условий их эксплуатации предложен альтернативный перечень аварийных сценариев, сгруппированных по генезису отказов. К гидрологическим сценариям отнесены: перелив через гребень при максимальном уровне половодья, размыв основания при пропуске дождевого паводка, водонасыщение тела сооружения при длительном стоянии высоких уровней воды, ледовые воздействия. К геомеханическим сценариям — оползень верхового откоса при быстрой сработке уровня, суффозионные деформации тела и основания, потеря устойчивости низового откоса при фильтрационных напорах. Сейсмические сценарии включают воздействие расчетной интенсивности с разжижением водонасыщенных грунтов основания и сейсмические деформации конструкций. Техногенные сценарии — повреждения при строительных работах в охранной зоне, нарушение эксплуатационного режима, ошибки эксплуатации [16, 17].

Для количественной оценки вероятности отказов предлагается модифицированный индексный метод с расчетом обобщенного индекса состояния $K_{\text{комб}}$, учитывающего фактические значения параметров повреждений и их предельно допустимые значения, а также коэффициенты значимости каждого фактора. Его можно вычислить по формуле:

$$K_{\text{комб}} = K_{\text{гидр}} \cdot K_{\text{геом}} \cdot K_{\text{сейсм}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{гидр}}$ — коэффициент гидрологического воздействия, который устанавливает показатель степени негативного влияния водных факторов на состояние сооружения (учитывает уровень воды в водотоке (половодье, паводки), интенсивность и продолжительность дождевых осадков, объем и скорость снеготаяния, скорость течения и волновые нагрузки, длительность стояния высоких уровней воды); $K_{\text{геом}}$ — коэффициент геомеханического состояния, который показывает текущую устойчивость грунтового основания и тела сооружения к механическим разрушениям (учитывает устойчивость откосов (коэффициент запаса устойчивости), фильтрационную прочность (градиенты напора), наличие суффозионных процессов, деформационные свойства грунтов (осадки, смещения), водонасыщение и разуплотнение грунтов); $K_{\text{сейсм}}$ — коэффициент сейсмического воздействия показывает интенсивность сейсмических нагрузок и способность сооружения их выдерживать (учитывает сейсмичность района (балльность), интенсивность возможного землетрясения (магнитуда, ускорение), тип грунтов основания по сейсмическим свойствам, сейсмостойкость конструктивных решений, наличие разжижения водонасыщенных грунтов).

В формуле (1) применяется мультипликативная (перемножение), а не аддитивная (сложение) модель. Во-первых, необходим при оценке эффект синергии. Если все три фактора действуют одновременно, их совместное влияние значительно сильнее, чем простая сумма. Например, водонасыщение $K_{\text{гидр}}$ снижает прочностные свойства грунта, сейсмика $K_{\text{сейсм}}$ на водонасыщенном грунте вызывает его разжижение — аварийное состояние. Во-вторых, принцип «слабого звена». Если хотя бы один из коэффициентов близок к критическому значению, общий риск резко возрастает (мультипликативный эффект). В-третьих, уравнение соотносится с теорией надежности. В расчетах надежности систем вероятность отказа при последовательном соединении элементов перемножается.

Составляющие формулы (1) для различных безнапорных сооружений IV класса опасности можно определить из следующих эмпирических выражений:

$$K_{\text{гидр}} = f \left(\frac{H_{\text{мах}}}{H_{\text{проект}}}, \frac{Q_{\text{павод}}}{Q_{\text{расч}}}, \frac{t_{\text{затоп}}}{t_{\text{крит}}} \right), \quad (2)$$

$$K_{\text{геом}} = f \left(\frac{K_{\text{уст}}}{K_{\text{уст.норм}}}, \frac{i_{\text{ф}}}{i_{\text{крит}}}, \frac{S}{S_{\text{пред}}}, \frac{U}{U_{\text{пред}}} \right), \quad (3)$$

$$K_{\text{сейсм}} = f \left(\frac{I_{\text{факт}}}{I_{\text{расч}}}, \frac{A_{\text{факт}}}{A_{\text{доп}}} \right), \quad (4)$$

здесь $H_{\text{мах}}$ — фактический максимальный уровень воды, м; $H_{\text{проект}}$ — проектный уровень воды по сооружению, м; $Q_{\text{павод}}$ — фактический расход паводка, м³/ч; $Q_{\text{расч}}$ — расчетный расход паводка, м³/ч; $t_{\text{затоп}}$ — продолжительность затопления, ч; $t_{\text{крит}}$ — критическая продолжительность затопления, ч; $K_{\text{уст}}$ — фактический коэффициент запаса устойчивости; $K_{\text{уст.норм}}$ — нормативный коэффициент запаса устойчивости; $i_{\text{ф}}$ — фактический фильтрационный градиент; $i_{\text{крит}}$ — критический фильтрационный градиент; S — фактическая осадка (вертикальное перемещение), м; $S_{\text{пред}}$ — предельная осадка (вертикальное перемещение), м; U — фактическое смещение (горизонтальное перемещение), м; $U_{\text{пред}}$ — предельное смещение (горизонтальное перемещение), м; $I_{\text{факт}}$ — фактическая сейсмическая интенсивность (баллы); $I_{\text{расч}}$ — расчетная сейсмическая интенсивность (баллы); $A_{\text{факт}}$ — фактическое сейсмическое ускорение, м/с²; $A_{\text{доп}}$ — допустимое сейсмическое ускорение, м/с².

Диапазоны значений для предлагаемых коэффициентов следующий: $K_{\text{гидр}} \in [0,1; 1,5]$ (чем выше значение $K_{\text{гидр}}$, тем сильнее гидрологическое воздействие на сооружение); $K_{\text{геом}} \in [0,5; 1,0]$ (чем ближе к 0,5, тем хуже состояние сооружения; 1,0 — идеальное состояние сооружения); $K_{\text{сейсм}} \in [1,0; 2,0]$ (1,0 — сейсмическое воздействие на сооружение отсутствует или пренебрежимо мало; >1,5 — высокая сейсмическая опасность для сооружения).

Интерпретация значений $K_{\text{комб}}$ на основании градации составляющих его коэффициентов (2), (3), (4) в формуле (1) представлена в **табл. 1**.

Таблица 1

Интерпретация значений $K_{\text{комб}}$

Значение $K_{\text{комб}}$	Интерпретация	Рекомендуемые действия
$\leq 0,3$	Состояние нормальное, риски низкие	Плановый мониторинг
0,3 – 0,6	Состояние удовлетворительное, риски средние	Усиленный контроль, проверка дренажей
0,6 – 0,85	Состояние неудовлетворительное, риски высокие	Внеплановое обследование, разработка мероприятий
$\geq 0,85$	Состояние аварийное, риски критические	Немедленные противоаварийные меры

Предложенная интерпретация значений $K_{\text{комб}}$, в отличие от действующей методики Ростехнадзора № 347, не требует расчета зон затопления и волны прорыва, а базируется на реально измеряемых параметрах состояния сооружения и внешних воздействиях. Каждому диапазону $K_{\text{комб}}$ поставлены в соответствие конкретные рекомендации по составу и периодичности контрольных мероприятий, что позволяет выстроить дифференцированную систему мониторинга в зависимости от текущего уровня риска. Разработанный подход создает основу для дальнейшей верификации предложенных моделей с данными натурных наблюдений.

Заключение

В результате проведенного системного анализа установлено, что методика Ростехнадзора № 347 не может быть применена к безнапорным берегоукрепительным сооружениям IV класса опасности ввиду отсутствия в ее сценарном аппарате сценариев, не связанных с образованием волны прорыва. Выявлены три основных ограничения: отсутствие геомеханических сценариев, невозможность корректной оценки ущерба (формулы ориентированы на затопление волной прорыва) и правовая неопределенность для эксплуатирующих организаций. Предложен альтернативный перечень из 11 аварийных сценариев, сгруппированных по четырем группам: гидрологические (4 сценария), геомеханические (3), сейсмические (2) и техногенные (2). Разработан модифицированный индексный метод оценки состояния сооружений с расчетом интегрального коэффициента $K_{комб}$, учитывающего мультипликативный эффект совместного воздействия гидравлических, геомеханических и сейсмических факторов. Определены диапазоны значений для каждого коэффициента и предложена шкала интерпретации $K_{комб}$ (от нормального состояния до аварийного) с соответствующими рекомендациями по действиям. Практическая значимость работы заключается в предоставлении эксплуатирующим организациям инструмента для оценки риска там, где действующая методика формально неприменима. Результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании нормативно-правовой базы в области промышленной безопасности ГТС.

Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (тема № 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

Библиографический список

1. Об утверждении Методики определения оцененного в рублях размера максимального вреда...: Приказ Ростехнадзора от 15.11.2024 № 347 // СПС «КонсультантПлюс»: [сайт]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_491893/ (дата обращения: 26.08.2026). — Текст: электронный.
2. Качаев А. Е. Совершенствование методики оценки максимального вреда при авариях гидротехнических сооружений // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. — 2026. — № 54. — С. 87–91. — DOI 10.26160/2474-5901-2026-54-87-91.
3. Ивашечкин В.В., Богославчик П. М., Веремеюк В. В., Немеровец О. В. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>.
4. Орехов Г.В., Кыонг Ч. Фильтрационная прочность грунта плотины в области трубчатого водосброса круглой формы. *Вестник МГСУ*. 2023; 18 (8): 1272–1282. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.8.1272-1282>.
5. Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Бакланова Д. В., Баев О. А., Михайлов Е. Д. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений: монография. — Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. — 283 с.
6. Ляпичев Ю. П. Методика анализа и оценки риска аварий гидросооружений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. — 2019. — Т. 15, № 4. — С. 327–336.

7. Курбанов С. О., Созаев А. А., Жемгуразов С. М. Анализ и оценка безопасности гидротехнических сооружений Верхнебалкарской малой гидроэлектростанции // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. — 2021. — № 2 (32). — С. 83–89.
8. Habets C. J. W., Peters D. J., de Gijt J., Metrikine A., Jonkman B. Model Solutions for Performance-Based Seismic Analysis of an Anchored Sheet Pile Quay Wall. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, (2016). 10(3), 248–260.
9. Kurihara O., Kawai Y., & Kaneko T. (2023). Backfilling configuration to improve tenacity of composite-type breakwaters. *Coastal Engineering Journal*, 65 (2), 217–233. DOI: 10.1080/21664250.2023.2167502.
10. Wei Xianglong, Dai Jiaqi, Zuo Liqin, Lu Yongjun, Yang Hanyuan, Lu Yan, Huang Tingjie, Lu Anping, Yuan Saiyu. Preliminary Study on the Failure Mechanism of the Flexible Mattress Protection Beach Under the Water Flow Scouring Using Generalized Model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32 (3): 773–786. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2024.03.010.
11. Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» (ред. от 28.12.2024). — М., 1997.
12. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М. : Минстрой России, 2019. — 56 с.
13. РД 153-34.2-002-01. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения. — М.: РАО «ЕЭС России», 2001. — 28 с.
14. Методика ФГУП РосНИИВХ. Методические принципы оценки риска аварийных ситуаций на водохранилищах малых рек. — Новочеркасск, 2021. — 45 с.
15. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности оценки технического состояния однородной грунтовой плотины по данным инженерных изысканий и математического планирования эксперимента // Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 128–137. — DOI 10.55287/22275398_2026_58_128.
16. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. — 2024. — № 3. — С. 6–10. — DOI 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
17. Мозголов М. В., Костюков В. В. О выборе места действия напряжений при анализе усилий в твердотельной модели вычислительного комплекса SCAD // Системные технологии. — 2023. — № 3 (48). — С. 122–129. — DOI 10.55287/22275398_2023_3_122.

ANALYSIS OF LIMITATIONS OF THE METHODOLOGY FOR CALCULATING PROBABLE DAMAGE FOR NON-PRESSURE HYDRAULIC STRUCTURES

I. R. Lesnikov
A. E. Kachaev

All-Russian scientific research institute of irrigation and agricultural supply systems “Raduga”, Kolomna

Abstract

The article presents a systematic analysis of the limitations of the Rostekhnadzor Methodology No. 347 as applied to non-pressure bank protection structures of IV hazard class. It is shown that the scenario framework of the methodology is focused on structures with a pressure front and the formation of a breakthrough wave, which is physically unrealizable for non-pressure structures. An alternative list of 11 accident scenarios grouped by failure genesis (hydrological, geomechanical, seismic, man-made) is substantiated. A modified index method for assessing the condition of structures is proposed with the calculation of an integral coefficient K_{comb} , taking into account the combined effect of hydrological, geomechanical and seismic factors. Threshold values of the coefficients are determined and recommendations for interpretation of the results for practical application are developed. The results can be used in improving the regulatory framework and in the practice of operation of non-pressure hydraulic structures of IV hazard class.

The Keywords

Bank protection structures, non-pressure hydraulic structures, hazard class, methodology, accident scenarios, geomechanical failure, risk assessment, natural and man-made impacts.

Date of receipt in edition

09.09.2026

Date of acceptance for printing

11.09.2026

Ссылка для цитирования:

И. Р. Лесников, А. Е. Качаев. Анализ ограничений методики расчета вероятного вреда для безнапорных гидротехнических сооружений. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 39–46.