

## ОЦЕНКА УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА АВАРИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*Н. Н. Линкевич, кандидат технических наук*

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

### Аннотация

Анализ опыта обследования белорусских гидроузлов и шламохранилищ ОАО «Беларускалий» показал, что причинами аварийных ситуаций могут быть дефекты изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. На каждом из данных этапов существуют риски аварий. Оценка их риска основывается на результатах контроля и анализа количественных и качественных характеристик состояния сооружения, окружающей среды в зоне его влияния, природных нагрузок и воздействий, ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС, соблюдения условий его безопасной эксплуатации и др. Аналогичный подход к оценке риска аварий гидротехнических сооружений по всей совокупности факторов, влияющих на надежность и безопасность сооружений, положен в основу нормативных документов, разработанных в России. При соответствующей адаптации методика может использоваться для оценки риска аварий на водохранилищах Беларуси. В статье дополнены и усовершенствованы составленные ранее автором совместно с Г. Г. Кругловым, В. В. Ивашечкиным и О. А. Мурашко показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечни факторов риска и их отличительные признаки по каждому показателю, характерные для белорусских водохранилищ. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в организациях в качестве типовой документации для оценки возможного риска аварий и состояния гидротехнических сооружений в период эксплуатации, а также при проведении обследований ГТС и др.

**Ключевые слова:** водохранилище, гидротехническое сооружение, безопасность, опасность, уязвимость, авария, риск, факторы риска аварий, отличительные признаки, уровень опасности, уровень уязвимости, уровень риска аварий.

### Abstract

*N. N. Linkevich*

### THE ASSESSING OF THE SAFETY LEVEL AND RISK OF ACCIDENTS OF HYDRAULIC STRUCTURES

The analysis of the experience of examining the Belarusian waterworks and sludge storage facilities of JSC «Belaruskali» showed that the causes of emergencies can be defects in the survey, design, construction and operation of structures. At each of these stages there are risks of accidents. The risk assessment is based on the results of control and analysis of quantitative and qualitative characteristics of the state of the structure, the environment in the zone of its influence, natural loads and impacts, expected damage from an accident or destruction of hydraulic structures, compliance with the conditions for its safe operation, etc. A similar approach to assessing the risk of accidents in hydraulic engineering structures for the entire set of factors affecting the reliability and safety of structures, is the basis of the regulatory documents developed in Russia. With appropriate adaptation, this approach can be used to assess the risk of accidents at reservoirs of the Republic of Belarus. The indicators for assessing the hazard of accidents and vulnerability of hydraulic structures, as well as lists of risk factors and their distinguishing features for each indicator, are supplemented and improved, compiled by the author together with G. G. Kruglov, V. V. Ivashechkin and O. A. Murashko, typical for Belarusian reservoirs. They can be recommended for practical use in organizations as standard documentation for assessing the possible risk of accidents and the state of hydraulic structures during operation, as well as when conducting surveys of hydraulic structures etc.

**Keywords:** reservoir, hydraulic structure, safety, danger, vulnerability, accident, risk, accident risk factors, distinctive signs, hazard level, vulnerability level, accident risk level.

### Введение

Процесс возведения и использования гидротехнических сооружений состоит из четырех этапов: изыскания; проектирование; организация и производство строительных работ в соответствии с разработанным проектом; эксплуатация построенных сооружений. На каждом из данных этапов существуют риски аварий, спо-

собные нарушить надежность и безопасность гидротехнических сооружений [1].

Гидротехнические сооружения классифицируют по нескольким признакам. По условиям их использования выделяют постоянные и временные. Постоянные ГТС в зависимости от назначения подразделяют на основные и второстепенные; основные ГТС в зависимости от

их высоты и типа грунтов оснований, социально-экономической ответственности и условий эксплуатации — на классы (I–IV). Для каждого класса сооружений устанавливаются дифференцированные требования [2]. Постоянные основные ГТС I, II, III класса относятся к объектам первого класса сложности, остальные — к объектам второго класса сложности; мелиоративные системы и сооружения, сооружения полносистемных прудовых рыбоводных хозяйств, рыбоводных промышленных комплексов — к объектам третьего класса сложности [3]. В связи с тяжелыми катастрофическими последствиями возможных аварий гидротехнических сооружений, особенно работающих под напором воды, к их надежности предъявляются повышенные требования.

Надежность гидротехнических сооружений можно установить по группе показателей, определяемых инженерными расчетами, а также по другой группе показателей, которые невозможно выявить расчетным путем и которые оцениваются на основании экспертного анализа.

**Экспертный анализ факторов, влияющих на риск аварий гидротехнических сооружений, проводится, как правило, на основании рассмотрения следующих основных материалов:**

- утвержденный архитектурный и строительный проекты, включая все внесенные в них изменения и данные об инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрологических, топографических и природно-климатических условиях строительства;
  - исполнительная документация, включая акты на скрытые работы;
    - декларация безопасности ГТС;
    - критерии безопасности ГТС;
    - правила использования водных ресурсов водохранилищ;
    - инструкция по эксплуатации с регламентацией должностных обязанностей обслуживающего персонала;
    - проект мониторинга ГТС;
    - инструкция по проведению натурных наблюдений (по мониторингу);
    - данные о соответствии проекту состава и состояния контрольно-измерительной аппаратуры (КИА);

- материалы геотехнического контроля в процессе строительства;

- материалы наблюдений состояния ГТС и окружающей среды в зоне влияния гидротехнического сооружения в период эксплуатации, данные о фактических на момент оценки риска аварии ГТС физико-механических и фильтрационных характеристиках материалов сооружения и основания;

- акты инспекторских проверок и комиссионных обследований состояния ГТС, расследований имевших место повреждений и аварий;

- результаты расчетов волны прорыва и оценки возможного ущерба;

- данные о службе эксплуатации ГТС и уровне культуры эксплуатации ГТС (укомплектованность и квалификация штатов, техническая оснащенность, наличие необходимых методических материалов, средств измерений и контроля, регулярность обследований состояния ГТС и проведения текущих ремонтов, привлечение к анализу данных натурных наблюдений специализированных организаций и пр.);

- данные о готовности объекта к локализации и ликвидации аварийных ситуаций (наличие плана ликвидации аварий по возможным сценариям, укомплектованность и оснащенность аварийных бригад и привлекаемых в случае необходимости формирований гражданской обороны инструментами и техникой, наличие и достаточность противоаварийного запаса материалов, регулярность противоаварийных тренировок, наличие и состояние средств связи и системы оповещения и т. п.);

- данные об организации санитарных, защитных и охранных зон гидротехнических объектов [4–10].

Оценка риска аварии ГТС включает оценку частоты (вероятности) и последствий возможной аварии ГТС и сравнение полученных результатов с допустимым уровнем риска аварии ГТС.

Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности, т. е. количественных и качественных характеристик состояния сооружения, окружающей среды в зоне его влияния, природных нагрузок и воздействий, ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС, наиболее существенных для данного сооружения, соблюдения условий его безопасной эксплуатации и др.

Количественные оценки опасности, уязвимости, риска аварии ГТС, определяются на основе того, что каждое из этих понятий является сложной функцией многих случайных переменных – факторов. Для получения количественных характеристик указанных понятий необходимо определить полный набор таких факторов. Их объединение по совокупностям будет являться, соответственно, показателями уязвимости, опасности и риска аварии ГТС. В зависимости от величин показателей строится градация по уровням опасности, уязвимости, риска аварии ГТС. Такой подход позволяет работать уже с достаточно ограниченным числом переменных и выполнять общую количественную оценку, которую можно назвать интегральной. За основу количественной оценки опасности, уязвимости, риска на ГТС чрезвычайной ситуации (аварий) (далее – ЧС) принят подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу [4, 5, 11–13].

Уровень опасности (уязвимости) по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок.

Код опасности (уязвимости) характеризует как количество показателей (четырёхзначный код), так и цифровое выражение уровня опасности (уязвимости) по каждому показателю (четыре уровня опасности (уязвимости)): 0 – опасность (уязвимость) отсутствует; 1 – малая опасность (уязвимость); 2 – средняя опасность (уязвимость); 3 – большая опасность (уязвимость). При этом каждый из четырех показателей опасности (уязвимости) стоит на соответствующем номеру месте.

Балл – цифровое выражение опасности ( $a_i$ ) и уязвимости ( $b_i$ ) в пределах установленного кода.

Численные значения баллов должны назначаться в соответствии с кодами, характеризующими уровень опасности (уязвимости) по тому или иному показателю с учетом приведенных ниже рекомендаций. Код по любому из показателей опасности (уязвимости), как правило, совпадает с баллом: например, для кода опасности 2132 – баллы  $a_1 = 2$ ;  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = 3$ ;  $a_4 = 2$ , а для кода уязвимости 3122 –

баллы  $b_1 = 3$ ;  $b_2 = 1$ ;  $b_3 = 2$ ;  $b_4 = 2$ . При этом дробные значения баллов показателей опасности (уязвимости) могут назначаться лишь в отдельных случаях в соответствии с экспертной оценкой при соответствующем обосновании.

*Диапазоны возможных балльных значений следующие:* уровню опасности (уязвимости) с кодом 0 соответствует балл 0, с кодом 1 – балл  $0 < a_i(b_i) \leq 1$ ; с кодом 2 – балл  $1 < a_i(b_i) \leq 2$ ; с кодом 3 – балл  $2 < a_i(b_i) \leq 3$ . Вопросы балльной оценки опасности (уязвимости) ГТС по каждому показателю решаются на этапе изучения имеющихся или получаемых в результате специальных исследований данных. Точность балльной оценки зависит от точности имеющихся данных.

Анализ результатов обследования ряда белорусских гидроузлов и шламоохранилищ ОАО «Беларуськалий» показал, что причинами аварийных ситуаций могут быть дефекты изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений [7, 14–21]. Аналогичный подход к оценке риска аварий гидротехнических сооружений по всей совокупности факторов, влияющих на надежность и безопасность сооружений, положен в основу нормативных документов, разработанных в НИИ ВОДГЕО и ВНИИ ГОЧСВ МЧС России [4, 5, 13].

Опыт использования данной методики [7, 15] свидетельствует, что при соответствующей адаптации она может использоваться для оценки риска аварий на водохранилищах Беларуси, но для получения всесторонней, оперативной и объективной оценки ее необходимо дополнить. Для этого и были усовершенствованы составленные ранее автором совместно с Г. Г. Кругловым, В. В. Ивашекиным и О. А. Мурашко [7] показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечни факторов риска и их отличительные признаки по каждому показателю. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в научно-исследовательских, проектных, строительномонтажных и эксплуатирующих организациях, экспертных центрах, органах, осуществляющих надзор за безопасностью гидротехнических сооружений и страховых компаниях в качестве типовой документации для оценки возможно-

го риска аварий и состояния гидротехнических сооружений водохозяйственного и промышленного назначения в период эксплуатации, а также при проведении обследований ГТС, декларировании их безопасности, экспертизе

### Основная часть

**Интегральная оценка опасности аварий гидротехнических сооружений** определяется по четырем показателям.

**1. Превышение принятых при обосновании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий ( $a_1$ ).** Основные факторы риска по первому показателю опасности приведены в [7].

При оценке риска аварии на гидротехническом сооружении по показателю опасности  $a_1$  также оцениваются возможные опасности возникновения негативных природных и техногенных воздействий на ГТС, которые определяются местоположением ГТС. К таким опасностям можно отнести сход селевых и снежных лавин, смерчи, ураганы, цунами, штормовой нагон, развитие карстово-суффозионных процессов, образование заторов, обрушение в водохранилище или накопителях береговых склонов, просадки, связанные с подработкой территории, падение летательного аппарата, взрыв (пожар, химическая авария) на транспортном средстве, диверсия, теракт и др.

Каждый из этих факторов риска может вызвать дефекты и разрушения сооружений различной степени тяжести – от локальных повреждений до перелива воды через гребень земляной плотины и ее размыва [7].

Дополненные и усовершенствованные отличительные признаки по первому показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды приведены в табл. 1.

**2. Обоснованность проектных решений и их соответствие современным нормативным требованиям ( $a_2$ ).** Основные факторы риска по второму показателю опасности, приведенные в [7], предлагается дополнить следующим: повышение класса гидротехнического

декларации безопасности, страховании рисков аварий, подготовке сведений для формирования регистра гидротехнических сооружений, разработке паспортов безопасности и др.

сооружения без проведения работ по оценке соответствия его новым требованиям.

Отличительные признаки по второму показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 2].

**3. Соответствие проекту конструкций сооружения, технологии его возведения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания ( $a_3$ ).** Основные факторы риска по третьему показателю опасности, приведенные в [7], предлагается дополнить следующими:

- отличие типов и конструкций гидромеханического оборудования и устройств по их управлению и ремонту, оборудования систем гидротранспорта и обратного водоснабжения, а также другого вспомогательного оборудования от принятых в проекте;
- отличие по номенклатурному и количественному составу и конструкции контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на ГТС от принятой в проекте.

Отличительные признаки по третьему показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды, приведены в [7, табл. 3]. Рекомендуется дополнить малый уровень опасности (код 1) следующими признаками, помимо ранее установленных:

- КИА, установленной на ГТС (по составу, количеству и качеству аппаратуры);
- вида материала и конструкции крепления откоса (например, вместо бетонного монолитного крепления верхового откоса выполнено железобетонное сборное крепление);
- низовой откос выполнен без промежуточной бермы при сохранении среднего расчетного заложения.

Таблица 1. Уровень опасности по первому показателю

Уровень опасности	Код балл	Отличительные признаки
Опасность отсутствует	$\frac{0}{0}$	Полное соответствие современным нормативным требованиям по всем факторам риска: показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС не отличаются от расчетных значений, принятых при проектировании. Отсутствует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера
Малая опасность	$\frac{1}{0 < a_1 \leq 1}$	<p>Показатели возможных нагрузок (гидростатические, ветровые, ледовые, от наносов) и воздействий (волновые, температурные) на ГТС незначительно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые не приведут к нарушениям эксплуатационного режима, повреждению отдельных конструктивных элементов и оборудования (образование заторов, обрушение в водохранилище береговых склонов и др.), при этом не возникает угроза возникновения ЧС. Например, наблюдаются следующие повреждения и дефекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• размывы травяного покрова на низовых откосах плотин;</li> <li>• разрушение уплотнений деформационных швов плит крепления верхового откоса плотины;</li> <li>• одиночные мелкие (до 0,2–0,3 мм) трещины в плитах крепления откосов и бетонных конструкциях сооружений;</li> <li>• локальные обнажения арматуры;</li> <li>• неглубокие сколы, раковины на поверхностях бетонных сооружений;</li> <li>• дефекты изоляции, отдельные белесые пятна выщелоченного бетона;</li> <li>• незначительная фильтрация через деформационные швы;</li> <li>• незначительные осадки сооружений.</li> </ul> <p>Не требуется дополнительных расчетных обоснований, конструктивных изменений и специальных организационных мероприятий для безопасной эксплуатации ГТС</p>
Средняя опасность	$\frac{2}{1 < a_1 \leq 2}$	<p>Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС существенно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые могут привести к нарушениям эксплуатационного режима, повреждению отдельных конструктивных элементов и оборудования (сход снежных лавин и др.), при этом возникает угроза возникновения ЧС локального характера. Например, наблюдаются:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• образование суффозионных воронок, провалы, просадки в районе расположения ГТС;</li> <li>• в береговой зоне ГТС – оползневые явления;</li> <li>• выход фильтрационного потока на низовой откос плотины;</li> <li>• оплывание низового откоса;</li> <li>• механическая суффозия грунта тела плотины и основания;</li> <li>• разрушение плит крепления верхового откоса плотины;</li> <li>• раскрытие конструктивных швов;</li> <li>• развитие трещин (более 0,3–0,5 мм) на поверхности бетонных конструкций;</li> <li>• повреждения затворов и закладных частей;</li> <li>• повороты, наклоны бычков, устоев.</li> </ul> <p>Требуется проведение дополнительных расчетных обоснований, конструктивных изменений и специальных организационных мероприятий для безопасной эксплуатации ГТС</p>
Большая опасность	$\frac{3}{2 < a_1 \leq 3}$	<p>Показатели возможных нагрузок и воздействий (прежде всего сейсмические воздействия или паводковые расходы) на ГТС значительно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, в связи с чем возникает прямая угроза разрушения ГТС и/или потери им способности выполнять заданные функции. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые могут привести к нарушениям эксплуатационного режима, разрушению конструктивных элементов и оборудования (район расположения ГТС находится в зоне боевых действий или действия террористических групп, сход селевых лавин и др.), при этом возникает угроза возникновения ЧС, превышающей локальную. Например, наблюдаются такие повреждения и дефекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• подъем уровня верхнего бьефа, перелив через гребень земляной плотины и прорыв напорного фронта;</li> <li>• превышение расчетного сейсмического воздействия, разрушение плотины и прорыв напорного фронта;</li> <li>• подмыв крутых берегов водохранилища и образование оползней;</li> <li>• разрушение бетонных сооружений гидроузлов.</li> </ul> <p>Необходимо проведение срочных организационных мероприятий и/или проектно-строительных работ по изменению режима эксплуатации и/или реконструкции (капитального ремонта) ГТС, вывода его из эксплуатации</p>

**4. Возможные последствия и ущерб при аварии гидротехнических сооружений ( $a_4$ ).** Отличительные признаки по четвертому показателю характеризуют каждый из четырех уровней опасности и соответствующие им

коды; определены в соответствии с классификацией масштабов возможных чрезвычайных ситуаций, принятой МЧС Республики Беларусь (табл. 2) [22].

Таблица 2. Возможные последствия и ущерб при аварии гидротехнических сооружений ( $a_4$ )

Уровень опасности	Код балл	Масштаб возможной ЧС	Отличительные признаки			
			число пострадавших, чел.	нарушены условия жизнедеятельности, чел.	базовая величина материального ущерба	зона распространения ЧС
Опасность отсутствует	$\frac{0}{0}$	—	—	—	—	—
Малая опасность	$\frac{1}{0 < a_4 \leq 1}$	локальная	<10	<100	40–1000	не выходит за пределы территории гидроузла
Средняя опасность	$\frac{2}{1 < a_4 \leq 2}$	местная	10–50	100–300	1000–5000	не выходит за пределы населенного пункта, города, района
Большая опасность	$\frac{3}{2 < a_4 \leq 3}$	региональная	50–500	300–500	5000–500 000	не выходит за пределы области
		республиканская	>500	>500	>500 000	выходит за пределы более чем двух областей
		трансграничная	—	—	—	поражающие факторы выходят за пределы Беларуси

По отличительным признакам, приведенным в табл. 1–2, а также в [7, табл. 2 и 3], с учетом дополненных нами, и соответствующим им кодам (баллам) определяется коэффициент опасности  $\lambda$  в виде доли от наиболее неблагоприятной ситуации на гидроузле по сочетанию показателей опасности. Наиболее неблагоприятному сочетанию уровней четырех рассмотренных показателей опасности соответствует интегральный код 3333 при баллах  $a_1 = 3$ ;  $a_2 = 3$ ;  $a_3 = 3$ ;  $a_4 = 3$ , при котором коэффициент опасности  $\lambda = 1,0$ ; в остальных случаях  $\lambda$  изменяется в диапазоне:  $0 \leq \lambda < 1$ .

Коэффициент опасности  $\lambda$  определяется по соотношению

$$\lambda = \lambda_0 \sum_{i=1}^4 \delta_i a_i \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  – нормирующий множитель показателя опасности;  $\delta_i$  – коэффициент значимости  $i$ -го показателя опасности;  $a_i$  – значение балла  $i$ -го показателя опасности.

Поскольку выбрана трехбалльная система (максимальная опасность – балл 3), то  $\lambda_0 = 1/3$ .

Количественные оценки коэффициентов значимости показателей опасности  $\delta_i$  приведены в [5] и составляют для первого и треть-

го показателей опасности 0,3, а для второго и четвертого – 0,2.

Расчетная величина коэффициента опасности  $\lambda$  является критерием для оценки интегральной опасности процессов на ГТС.

**Интегральная оценка уязвимости гидротехнических сооружений** определяется их восприимчивостью, а также восприимчивостью окружающей среды (в зоне влияния сооружения) к воздействию факторов опасности по следующим четырем показателям.

#### 1. Состояние сооружения (по данным натурных обследований) ( $b_1$ ).

Экспертная оценка уязвимости ГТС по первому показателю производится на основе анализа результатов визуальных и инструментальных наблюдений, осмотров, комиссионных обследований и специальных изыскательских и научно-исследовательских работ. Состояние сооружения и его основания оцениваются с учетом установленных нарушений их конструктивных элементов и соответствия контролируемых параметров их предельно допустимым значениям (ПДЗ). ПДЗ параметров состояния, соответствующие допустимому уровню риска аварии ГТС, принимаются равными расчетным

значениям для основного и особого сочетания нагрузок или значениям, уточненным в процессе эксплуатации и утвержденные в установленном порядке органами исполнительной власти, уполномоченными на осуществление государственного надзора в области безопасности ГТС.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по первому показателю, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 5]. Рекомендуется дополнить большой уровень уязвимости (код 3) таким признаком, помимо ранее установленных, как неисправность или отсутствие электропитания приводных устройств.

По первому показателю уровень уязвимости ГТС, находящихся в эксплуатации более 50 лет, рекомендуется повышать на один уровень (если отсутствуют данные инструментального обследования по определению фактических геометрических параметров, физико-механических характеристик материалов основания и тела ГТС, а также его конструктивных элементов, оценки состояния гидромеханического оборудования и др.).

## **2. Состояние окружающей среды в зоне влияния гидротехнического сооружения (по данным мониторинга) ( $b_2$ ).**

Экспертная оценка уязвимости ГТС по второму показателю производится на основе анализа результатов мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС и сравнения контролируемых параметров с ПДЗ, которые устанавливаются в соответствии с нормативными и/или проектными требованиями.

К основным факторам риска по второму показателю уязвимости относятся:

- несоблюдение правил организации и содержания водоохраных зон и зон санитарной охраны;
- несоответствие мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС нормативным и/или проектным требованиям;
- несоответствие количества КИА нормативным и/или проектным требованиям и/или неработоспособность части КИА;
- несоблюдение установленной периодичности осмотров и наблюдений нормативным и/или проектным требованиям;

- несоответствие проводимых наблюдений по составу нормативным и/или проектным требованиям;
  - наличие «цветения» воды в водохранилище непитьевого назначения;
  - несоответствие качества воды в водохранилище или накопителе установленным нормам и/или проектным требованиям;
  - несоответствие качества грунтовых вод в зоне влияния накопителей жидких отходов нормам и/или проектным требованиям;
  - несоответствие качества воды в поверхностных водоемах, попадающих в зону влияния ГТС, нормам и/или проектным требованиям;
  - несоответствие показателей качества донных отложений водохранилищ и накопителей отходов, а также складированных гидромеханическим способом промышленных отходов нормативным и/или проектным значениям;
  - несоответствие содержания вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения нормам и/или проектным требованиям;
  - наличие процессов загрязнения почв и подстилающих их грунтов в зоне влияния накопителей жидких отходов;
  - несоблюдение нормативных или проектных показателей по доле мелководных зон в площади водохранилища;
  - наличие эрозии береговой зоны водохранилищ;
  - наличие заболачивания территории в нижнем бьефе водохранилища;
  - наличие пыления береговой зоны водохранилищ и особенно накопителей жидких отходов;
  - наличие переноса вредных, токсичных и ядовитых жидкостей из накопителей жидких отходов в процессе испарения;
  - наличие изменений состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, связанных с ухудшением здоровья и гибелью растений и животных, а также с уменьшением видового и численного состава растений и животных.
- Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по второму показателю, и соответствующие им коды приведены в табл. 3.

Таблица 3. Уровень уязвимости гидротехнических сооружений по второму показателю ( $b_2$ )

Уровень уязвимости	Код балл	Отличительные признаки
Уязвимость отсутствует	$\frac{0}{0}$	Отсутствуют какие-либо нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС
Малая уязвимость	$\frac{1}{0 < b_2 \leq 1}$	<p>Имеются локальные нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС при отсутствии превышения предельно допустимых значений контролируемых параметров состояния. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• содержание вредных веществ в грунтовых водах, почве, грунтах и поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения превышает фоновые показатели, но меньше ПДЗ;</li> <li>• временное «цветение» воды в водохранилище непитьевого назначения;</li> <li>• эрозия берегов на ограниченных участках;</li> <li>• временное пыление береговых зон;</li> <li>• на ограниченных участках изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС (заболочивание, залужение и т. п.)</li> </ul>
Средняя уязвимость	$\frac{2}{1 < b_2 \leq 2}$	<p>Имеются нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС, которые не могут быть устранены без проведения неотложных ремонтных работ и/или изменения режима эксплуатации объекта. Наблюдаются превышения ПДЗ контролируемых параметров. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• существенное ухудшение качества воды и/или донных отложений в водохранилище при соблюдении ПДЗ;</li> <li>• содержание вредных веществ в грунтовых водах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ;</li> <li>• содержание вредных веществ в поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ;</li> <li>• содержание вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ;</li> <li>• пыление береговых зон;</li> <li>• на значительных участках – эрозия берегов;</li> <li>• на значительных участках – изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, например, заболочивание, залужение и т. п.;</li> <li>• долговременное «цветение» воды в водохранилище непитьевого назначения;</li> <li>• изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС с уменьшением видового и численного состава растений и животных;</li> <li>• незначительный перенос вредных, токсичных и ядовитых веществ из накопителей жидких отходов в процессе испарения при соблюдении их ПДЗ на прилегающих территориях;</li> <li>• отдельные нарушения правил организации и эксплуатации санитарных зон;</li> <li>• организация мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС по отдельным позициям не соответствует нормативным и/или проектным требованиям: <ul style="list-style-type: none"> <li>а) недостаточное количество и/или неработоспособное состояние части КИА;</li> <li>б) несоблюдение установленной периодичности осмотров и наблюдений;</li> <li>в) несоответствие проводимых наблюдений по составу и т. п.</li> </ul> </li> </ul>
Большая уязвимость	$\frac{3}{2 < b_2 \leq 3}$	<p>Имеются существенные нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС, приводящие к деградации и разрушению отдельных ее элементов (почва, водные объекты, флора, фауна и т. п.) или системы в целом. Наблюдаются превышения ПДЗ контролируемых параметров состояния. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• содержание вредных веществ в грунтовых водах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ;</li> <li>• содержание вредных веществ в поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ;</li> <li>• содержание вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ;</li> <li>• качество воды и/или донных отложений в водохранилище не соответствует установленным ПДЗ;</li> <li>• не соблюдаются правила организации и эксплуатации санитарных зон;</li> <li>• не проводится мониторинг состояния окружающей среды (за исключением случаев, когда отказ от такого мониторинга обоснован);</li> <li>• необратимые изменения состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, связанные с ухудшением здоровья и гибелью растений и животных.</li> </ul> <p>Дальнейшая эксплуатация сооружения невозможна. Требуется обязательное проведение работ по рекультивации и восстановлению окружающей среды</p>



### 3. Организация эксплуатации гидротехнических сооружений (соблюдение требований безопасной эксплуатации) ( $b_3$ ).

К основным факторам риска по третьему показателю уязвимости относятся:

- недоукомплектованность штатов и недостаточный уровень квалификации эксплуатационного персонала;
- недоукомплектованность необходимой техникой, механизмами, инструментами, расходными материалами и т. п.;
- частичное или полное отсутствие необходимой проектной, эксплуатационной и нормативно-методической документации по сооружениям гидроузла (проекта гидротехнического сооружения; декларации безопасности; критериев безопасности; правил использования водных ресурсов водохранилища; инструкции по эксплуатации ГТС с регламентацией должностных обязанностей персонала, схемы заполнения накопителя промышленных отходов, вопросов техники безопасности и охраны окружающей среды; инструкции по мониторингу (проведению контрольных наблюдений) ГТС; ежегодных графиков планово-предупредительных ремонтов сооружений, сетей и оборудования, а также данных о фактически проведенных работах; материалов геотехнического контроля в процессе строительства; документации по проводимым эксплуатирующей организацией наблюдениям за состоянием ГТС и окружающей среды (журналов и графиков наблюдений, приказов и распоряжений в связи с выявленными недостатками и т. п.); обобщенных материалов наблюдений в период эксплуатации (годовых отчетов, аналитических записок, заключения и рекомендаций специализированных организаций), а также материалов инспекторских проверок и обследований состояния ГТС; документации по расследованию аварий и повреждений; предписаний органов государственного и авторского надзора; нормативно-методических пособий и рекомендаций, необходимых для эксплуатации рассматриваемого гидротехнического сооружения, в том числе правил безопасности, методических пособий по проведению мониторинга и ремонтных работ, заводских паспортов и инструкций по эксплуатации установленного гидромеханического, насосного и вспомогательного оборудования и т. п.);

- отсутствие и/или неработоспособность части контрольно-измерительной аппаратуры;
- нерегулярность контрольных наблюдений и комиссионных обследований состояния ГТС;
- недостаточный уровень и нерегулярность технического обслуживания и ремонта оборудования (механизмов) и сооружений;
- несоблюдение правил эксплуатации (режима наполнения и сработки водохранилища, маневрирования затворами, схемы и интенсивности заполнения накопителя и др.);
- несоблюдение правил организации и содержания защитных и охранных зон ГТС, в том числе наличие (при необходимости) предупредительных и запретительных знаков, ограждения, освещения, охраны, а также иных разработанных мероприятий по предотвращению несанкционированного проникновения в охранную зону, обеспечивающих антитеррористическую защищенность объекта.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по третьему показателю, и соответствующие им коды, приведены в [7, табл. 6]. Рекомендуется дополнить средний уровень уязвимости (код 2) следующими признаками, помимо ранее установленных:

- отсутствие запаней;
  - отсутствие полыней перед затворами и сооружениями, не рассчитанными на давление льда;
  - несоблюдение правил организации и эксплуатации защитных и охранных зон гидротехнического объекта (при отсутствии прямой угрозы теракта или диверсии);
- большой уровень уязвимости (код 3) – такими признаками:
- эксплуатация устройств и механизмов, выработавших нормативный ресурс;
  - несоблюдение правил организации и эксплуатации защитных и охранных зон гидротехнического объекта (при наличии прямой угрозы теракта или диверсии).

### 4. Готовность организации, эксплуатирующей ГТС, к предупреждению, локализации и ликвидации ЧС ( $b_4$ ).

К основным факторам риска по четвертому показателю уязвимости относятся:

- отсутствие типовых решений по локализации и ликвидации чрезвычайных (аварийных) ситуаций по возможным сценариям их разви-

тия на ГТС объекта, плана оперативных действий персонала при возникновении ЧС, плана эвакуации персонала и населения из зоны возможного затопления волной прорыва;

- неподготовленность персонала к действиям в условиях ЧС;

- отсутствие и неуккомплектованность аварийно-ремонтных и аварийно-спасательных бригад;

- нерегулярность проведения тренировок аварийно-ремонтных бригад и дежурного персонала гидроузла по локализации и ликвидации аварийных ситуаций;

- недостаточная оснащенность аварийно-ремонтных бригад и привлекаемых в случае необходимости для ликвидации ЧС формирований инструментом, оборудованием и механизмами для выполнения аварийно-спасательных работ;

- отсутствие и недостаточность аварийного запаса строительных материалов для локализации и ликвидации аварийной ситуации;

- отсутствие и плохое состояние дорог, мостов и подъездов к гидроузлу и на его территории;

- отсутствие и плохое состояние средств связи (в том числе аварийных) и системы оповещения персонала и населения в нижнем бьефе ГТС;

- отсутствие заключения о готовности организации, эксплуатирующей ГТС, к локализации и ликвидации ЧС и защите населения и территорий в случае аварии ГТС;

- отсутствие структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по четвертому показателю, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 7].

Рекомендуется дополнить средний уровень уязвимости (код 2) такими признаками, помимо ранее установленных, как нерегулярные проверки и опробование аварийных средств связи и систем оповещения персонала и/или населения в нижнем бьефе ГТС;

большой уровень уязвимости (код 3) – следующими признаками:

- неподготовленность персонала к действиям в условиях ЧС;

- отсутствие подъездов к ГТС;

- отсутствие средств связи (в том числе аварийных) и надежной системы оповещения персонала и/или населения в нижнем бьефе ГТС;

- отсутствие заключения о готовности организации, эксплуатирующей ГТС, к локализации и ликвидации ЧС и защите населения и территорий в случае аварии на ГТС.

Каждый из рассмотренных показателей уязвимости может проявляться независимо от других, а уровень уязвимости ГТС зависит от их комплексного воздействия.

По отличительным признакам, приведенным в табл. 3, а также в [7, табл. 5–7], с учетом дополненных нами, и соответствующим им кодам (баллам) определяется коэффициент уязвимости  $v$  в виде доли от наиболее неблагоприятной ситуации на гидроузле по сочетанию показателей уязвимости. Наиболее неблагоприятному сочетанию уровней четырех рассмотренных показателей уязвимости соответствует интегральный код 3333 при баллах  $b_1 = 3; b_2 = 3; b_3 = 3; b_4 = 3$ , при котором  $v = 1,0$ , в остальных случаях  $v$  изменяется в диапазоне:  $0 \leq v < 1$ .

Коэффициент уязвимости  $v$  определяется по формуле

$$v = v_0 \sum_{i=1}^4 \varphi_i b_i \quad (2)$$

где  $v_0$  – нормирующий множитель показателя уязвимости;  $\varphi_i$  – коэффициент значимости  $i$ -го показателя уязвимости;  $b_i$  – значение балла  $i$ -го показателя уязвимости.

Поскольку выбрана трехбалльная система (максимальная уязвимость – балл 3), то  $v_0 = 1/3$ .

Количественные оценки коэффициентов значимости показателей уязвимости  $\varphi_i$  приведены в [5, 13] и составляют для первого показателя уязвимости 0,35, второго – 0,15, третьего – 0,3, четвертого – 0,2.

**Оценка риска аварии на гидроузле** производится на основании экспертного анализа уровня опасности аварии и уровня уязвимости гидротехнических сооружений. Для оценки уровня риска аварии определяется коэффициент риска аварии  $R$  на основе принципа пересечения этих событий (риск возникает только в области пересечения опасности с объектом и не существует без них):

$$R = \lambda v. \quad (3)$$

Коэффициент риска аварии  $R$  представляет собой долю от максимального риска, возмож-

ного на гидроузле при наиболее неблагоприятных сочетаниях показателей опасности (код 3333,  $\lambda = 1$ ) и уязвимости (код 3333,  $\nu = 1$ ), т. е. меру (дозу) опасного воздействия на данное ГТС с установленным уровнем уязвимости.

Уровень риска аварии и уровень безопасности ГТС оценивается по величине коэффициента риска аварии  $R$  в соответствии с данными табл. 4 [4].

Таблица 4. **Уровень риска аварии и уровень безопасности гидротехнических сооружений**

Уровень риска аварии (уровень безопасности ГТС)	Коэффициент риска аварии $R$
Малый (нормальный уровень безопасности)	не более 0,15
Умеренный (пониженный уровень безопасности)	свыше 0,15, но не более 0,3
Большой (неудовлетворительный уровень безопасности)	свыше 0,3, но не более 0,5
Аварийная ситуация (критический уровень безопасности)	свыше 0,5

При этом следует иметь в виду, что если хотя бы один показатель опасности или уязвимости принимает максимальное значение, равное 3, то *уровень безопасности принимается неудовлетворительным*.

Диапазоны изменения коэффициента  $R$  в табл. 4 установлены таким образом, чтобы была возможность практически увязать характеристики риска аварии с качественными характеристиками уровня безопасности, регламентированными [23].

В области значений коэффициента риска аварии  $R \leq 0,15$  (малый уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как нормальный. Сооружение удовлетворяет всем проектным требованиям по назначению и конструктивной надежности, а также современным нормативным требованиям. Критерии безопасности, то есть предельные значения количественных и качественных показателей состояния гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии гидротехнического сооружения и утвержденные в порядке, установленном законодательством, не превышают предельно допустимые для работоспособного состояния сооружения и основания. Физический износ конструкций – до 10 %. Малозначительные дефекты устраняют в процессе установленного регламента технического обслуживания. При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация сооружения в со-

ответствии с функциональным назначением разрешается без ограничений до очередного обследования при обеспечении мониторинга безопасности.

В области значений коэффициента риска аварии  $0,15 < R \leq 0,30$  (умеренный уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как пониженный. Эксплуатирующей организацией допускается нарушение правил технической эксплуатации, невыполнение первоочередных мероприятий или неполное выполнение предписаний органов государственного надзора по обеспечению безопасности гидротехнического сооружения при прочих показателях, соответствующих нормальному уровню безопасности ГТС. Критерии безопасности не превышают предельно допустимые для работоспособного состояния сооружения и основания. Физический износ конструкций – от 10 до 30 %. Имеющиеся дефекты не приводят к нарушению работоспособности конструкции в конкретных условиях эксплуатации, но в перспективе могут снизить ее долговечность. Дефекты устраняют в процессе технического обслуживания и текущего ремонта, уточненные сроки которого могут быть назначены аттестованным специалистом по обследованию зданий (сооружений). При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация сооружения (конструкции) разрешается без ограничений до очередного обследования. Конкретный перечень мероприятий по повышению уровня безопасности вытекает

из анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости.

При значении коэффициента риска аварии  $0,30 < R \leq 0,50$  (большой уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как неудовлетворительный. Снижена механическая или фильтрационная прочность элементов сооружений, превышены предельно допустимые критерии безопасности для работоспособного состояния, другие отклонения от проектного состояния, способные привести к аварии. Физический износ конструкций – 31–50 %. Имеющиеся дефекты оказывают некоторое влияние на несущую способность конструкции, но опасность внезапного разрушения отсутствует. Эксплуатация сооружения (конструкции) при фактических нагрузках разрешается при периодическом контроле его (ее) состояния, строгом соблюдении всех эксплуатационных требований, при возможных ограничениях некоторых параметров эксплуатации. Требуется детальное обследование и расчет прочности и устойчивости сооружения (конструкции) с оценкой степени ее нагруженности ( $CH \leq 0,95$ ), а также разработка мероприятий по ремонту и при необходимости — усилению конструкции. Не усиленные конструкции требуют повторного обследования в сроки, установленные аттестованным специалистом по обследованию зданий. Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме недопустима без проведения в установленные органами государственного надзора сроки тех или иных технических (вплоть до капитального ремонта, замены оборудования и др.) и организационных мероприятий по снижению риска аварии и восстановлению нормального уровня безопасности на основе анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости. К проведению такого анализа и разработке мероприятий по повышению уровня безопасности должны, как правило, привлекаться специализированные научно-исследовательские и проектные организации. В случае необходимости по специальным программам предусматриваются полевые исследования физико-механических характеристик грунтовых материалов, бетонных конструкций

и т. д., корректируются ПДЗ контролируемых параметров состояния и пр.

Значения коэффициента риска аварии  $R > 0,50$  свидетельствуют о возникновении аварийной ситуации, уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как *критический*. Эксплуатация сооружения (конструкции) происходит при развивающемся снижении прочности и устойчивости элементов конструкции и основания, превышении предельно допустимых критериев безопасности, характеризующих переход от ограниченно работоспособного к неработоспособному состоянию сооружения и основания. Физический износ конструкций – 51–70 %; значительная степень поврежденности конструкции или ее перегрузка (степень нагруженности  $CH > 1$ ); высокая вероятность разрушения данной конструкции. В этом случае дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме по условиям риска аварии недопустима и должна осуществляться в соответствии с требованиями [24].

При критическом уровне безопасности ГТС необходимы незамедлительное ограничение нагрузок (снижение уровня верхнего бьефа и др.), срочное усиление или замена конструкции (уточняется расчетом). Замена конструкции выполняется при значительной сложности или экономической нецелесообразности ее усиления. В исключительных случаях до выполнения восстановительных работ разрешается временная эксплуатация данного участка или ГТС в целом на срок, установленный аттестованным специалистом по обследованию зданий (сооружений), при непрерывном осуществлении мониторинга состояния конструкции и неукоснительным выполнении конкретных страховочных мероприятий (ограждения опасных зон, ограничения нагрузок, скорости и путей передвижения транспорта и т. п.). Мероприятия по восстановлению нормального уровня безопасности должны выполняться на основании анализа факторов, обуславливающих возникновение аварийной ситуации, с обязательным привлечением специализированных организаций. После проведения необходимых мероприятий перевод сооружений вновь в проектный режим эксплуатации должен быть согласован с органами госнадзора за безопасностью гидротехнических сооружений.

Расчеты коэффициента риска аварии  $R$  позволяют не только определять уровень безопасности ГТС, но и оценивать вероятность возникновения аварии  $P_a$  (ГТС) по методике, разработанной в НИИ ВОДГЕО и Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС [5, 13]. При этом допустимые значения вероятности возникновения аварий на водонапорных ГТС I–III классов опасности  $P_{\text{доп}}$  (ГТС) в соответствии с СН 3.04.01-2020 [2] составляют для сооружений классов: I –  $5 \cdot 10^{-5}$ ; II –  $5 \cdot 10^{-4}$  и III –  $3 \cdot 10^{-3}$  1/год (в России для III класса  $P_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  1/год). Допустимое значение вероятности возникновения аварии на водонапорных ГТС IV класса в [2] не приводится, поэтому в соответствии с [13, 25] для IV класса  $P_{\text{доп}}$  можно принять равным  $5 \cdot 10^{-3}$  1/год. Классификация уровня риска по значению вероятности аварии ГТС I–IV классов в нормах Республики

### Заключение

Дополненные и усовершенствованные показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечень факторов риска и их отличительные признаки для всех этапов создания и использования ГТС различных типов и классов позволяют после выполнения детального обследования гидротехнических сооруже-

Беларусь также не приводится, ее можно принимать в соответствии с [13].

Если при оценке риска аварии гидротехнических сооружений вне зависимости от конечных величин  $R$  и  $P_a$  (ГТС) установлены максимальные значения тех или иных показателей опасности и уязвимости с кодом З, собственник (эксплуатирующая организация) обязан информировать об этом органы государственного надзора за безопасностью гидротехнических сооружений и принять меры по устранению причин, вызывающих повышенную опасность или уязвимость сооружения по конкретному показателю в сроки, установленные соответствующим предписанием органов госнадзора.

Оценка риска аварии ГТС как мера опасности в виде возможных потерь в экономической, социальной и экологической сферах может быть выполнена в соответствии с [5, 13].

ний, определения их технического состояния объективно оценивать уровень безопасности и риска аварий на гидротехнических сооружениях Беларуси. Это позволит выявить наиболее опасные водохранилища, а затем своевременно разработать мероприятия по предотвращению аварий.

### Библиографический список

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002-89. – Введ. 01.07.90. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 37 с.
2. Гидротехнические сооружения общего назначения. СН 3.04.01-2020. – Введ. 13.07.2021. – Минск : М-во архитектуры и стрва Респ. Беларусь, 2021. – 135 с.
3. Объекты строительства. Классификация. СН 3.02.07-2020. – Введ. 10.06.2021. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 9 с.
4. Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов / Н. Н. Розанов [и др.]; под науч. рук. Н. Н. Розанова и Н. П. Куранова ; науч. ред. В. С. Алексеев и Э. М. Хохлатов. – М. : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. – 43 с.
5. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности / Федер. агентство Рос. Федерации по стр-ву и жилищно-коммунальному компл. ; ред. Н. П. Куранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ДАР/ВОДГЕО, 2009. – 64 с.
6. Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений : стандарт предприятия: СТП НИИЭС / И. Н. Иващенко [и др.]; под науч. рук. И. Н. Иващенко. – Утв. и введ. в действие приказом № 14 от 01.06.2004. – М. : ОАО «Науч.-исслед. ин-т энергетических сооружений», 2004. – 24 с.

7. Круглов, Г. Г. Факторы риска и их отличительные признаки для оценки степени опасности водохранилищ / Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин, Н. Н. Линкевич, О. А. Мурашко // Мелиорация. – 2017. – № 1 (79). – С. 22–30.

8. Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации гидротехнических сооружений и устройств на опасных производственных объектах (в ред. постановления МЧС от 22.03.2017, № 6) : постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 30 марта 2015 г., № 15 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – 11.04.2015. – 8/29775.

9. Обследовать состояние и дать экспертную оценку риска аварий подпорных гидротехнических сооружений потенциально опасных водохранилищ Республики Беларусь при пропуске половодий и паводков [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключ.) : ГБ 16-29 / Белорус. нац. техн. ун-т ; науч. рук. В. В. Ивашечкин ; исполн.: Г. Г. Круглов [и др.]. — Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 78 с. – № ГР 20162259.

10. Разработка методики определения опасности водохранилищ в Республике Беларусь при половодьях и паводках на примере гидроузлов Минской области [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключ.) : ГБ 14-137 / Белорус. нац. техн. ун-т ; науч. рук. В. В. Ивашечкин; исполн.: Г. Г. Круглов [и др.]. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 62 с. – № ГР 20140703.

11. Рагозин, А. Л. Теория и практика оценки геологических рисков : дис. в виде науч. докл. ... д-ра геол.-минералог. наук : 04.00.07 / А. Л. Рагозин ; НИИ по инж. изысканиям в стр.-ве. – М. : 1997. – 60 л.

12. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г. Л. Кофф [и др.]. – М. : Изд.-полигр. комплекс РЭФИА, 1997. – 364 с.

13. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. Общие положения : ГОСТ Р 22.2.09-2015. – Введ. 01.06.2016. – М. : Стандартиформ, 2016. – 27 с.

14. Круглов, Г. Г. Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилища «Заславское» и мероприятия по предотвращению их разрушения фильтрационным потоком / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2015. – № 1 (73). – С. 160–165.

15. Круглов, Г. Г. Как оценить опасность водохранилища / Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2016. – № 1 (75). – С. 32–38.

16. Круглов, Г. Г. Опыт натурных обследований гидроузлов неэнергетического назначения и малых ГЭС с целью их восстановления / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6. – С. 92–94.

17. Ивашечкин, В. В. Оценка опасности Тетеринского водохранилища на реке Друть Круглянского района Могилевской области / В. В. Ивашечкин, В. В. Веремеюк, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. А. Мурашко, И. В. Недашковская // Вест. ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 62–71.

18. Круглов, Г. Г. Исследование технического состояния судоходной плотины гидроузла «Стахово» Лунинецкого района Брестской области / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2018. – № 4 (86). – С. 31–37.

19. Круглов, Г. Г. Исследование технического состояния шлюза-регулятора на реке Лань / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2020. – № 2 (92). – С. 17–24.

20. Круглов, Г. Г. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. В. Немеровец // Наука и техника. – 2020. – Т. 19, № 3. – С. 252–257.

21. Богославчик, П. М. Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 292–297.

22. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Закон Респ. Беларусь, 5 мая 1998 г., № 141-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 20.03.2001. – № 2/673.

23. Об утверждении Правил эксплуатации гидротехнических сооружений и устройств для энергетических (гидроэнергетических и теплоэнергетических) нужд : постановление М-ва энергетики Респ. Беларусь, 22 июня 2020 г., № 22 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – 12.08.2020. – № 8/35696.

24. Техническое состояние зданий и сооружений. СН 1.04.01-2020. – Введ. 23.03.2021. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 66 с.

25. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 (с изм. N 1) : СП 58.13330.2012. – Введ. 01.01.2013. – М. : Минрегион России, 2012. – 37 с.

Поступила 11 августа 2021 г.