

УДК: 626/627.01.34.096

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

## **Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений**

**Обеспечение сейсмостойкости гидротехнических сооружений при землетрясениях**

**Калиберда Инна Васильевна<sup>1</sup>, Пименов Владимир Иванович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность».

Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Москва, Российская Федерация

**Аннотация:** В России в зонах высокой сейсмичности (7 и более баллов) размещено значительное число гидроэлектростанций (далее – ГЭС). Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (далее – ГТС) ГЭС при землетрясениях является актуальной задачей. Авторами статьи указывается на отсутствие достаточных обоснований сейсмостойкости ГТС по причине того, что нормативное регулирование безопасности ГТС при сейсмических воздействиях получило развитие в России и за рубежом только в конце 20 века, поэтому находящиеся уже длительное время в эксплуатации ГТС не проектировались с учетом сейсмических воздействий. В связи с этим существует риск их уязвимости при землетрясениях. В статье приводится краткий обзор зарубежного опыта по обеспечению сейсмостойкости плотин, находящихся в эксплуатации. Приводится обзор с оценкой полноты и достаточности положений и требований действующей нормативной базы по обеспечению сейсмостойкости гидротехнических сооружений в Российской Федерации, разработанной в начале 21 века. Основные положения и обязательные требования к обеспечению сейсмостойкости относятся к этапам проектирования и строительства. Для находящихся в длительной эксплуатации комплексов ГТС ГЭС применение этих предлагаемых методов требует индивидуального подхода. Авторами статьи указывается на необходимость разработки нормативного обеспечения для управления безопасностью ГТС, находящихся в длительной эксплуатации на сейсмически опасных территориях.

**Ключевые слова:** гидроэлектростанции, гидротехнические сооружения, землетрясения, федеральные законы, нормативные правовые акты, сейсмостойкость, риски, безопасность

**Для цитирования:** Калиберда И.В., Пименов В.И. Обеспечение сейсмостойкости гидротехнических сооружений при землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 3. С. 81–93.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

@ I.V. Kaliberda, V.I. Pimenov, 2023

## ***Design, building and reconstruction of aseismic constructions***

### **Ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in case of earthquakes**

**Kaliberda Inna V.<sup>1</sup>, Pimenov Vladimir I.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”.  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision).  
Moscow, Russian Federation

**Abstract:** A significant number of hydroelectric power plants (hereinafter referred to as HPPs) are located in areas of high seismicity (7 or more points) in Russia. Ensuring the safety of hydraulic structures (hereinafter – GTS) Hydroelectric power plants in case of earthquakes is an urgent task. The authors of the article point out the lack of sufficient justification for the seismic resistance of the GTS due to the fact that the regulatory regulation of the safety of GTS under seismic impacts was developed in Russia and abroad only at the end of the 20th century, therefore, the GTS that have been in operation for a long time were not designed taking into account seismic impacts. In this regard, there is a risk of their vulnerability to earthquakes. The article provides a brief overview of foreign experience in ensuring earthquake resistance of dams in operation. An overview is given with an assessment of the completeness and sufficiency of the provisions and requirements of the current regulatory framework for ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in the Russian Federation, developed at the beginning of the 21st century. The main provisions and mandatory requirements for ensuring earthquake resistance relate to the stages of design and construction. For GTS HPP complexes in long-term operation, the application of these proposed methods requires an individual approach. The authors of the article indicate the need to develop regulatory support for the safety management of GTS in long-term operation in seismically hazardous areas.

**Keywords:** hydroelectric power plants, hydraulic structures, earthquakes, federal laws, regulatory legal acts, earthquake resistance, risks, safety

**For citation:** Kaliberda I.V., Pimenov V.I. Ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in case of earthquakes. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 81–93. [In Russian]

**DOI** [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

### **Введение**

На отдельных территориях Российской Федерации периодически возникают землетрясения. Основными сейсмически активными точками являются территории на Камчатке, Восточной Сибири, Кавказе, Алтае, Сахалине, а также Курильские острова и другие горные местности.

В ФБУ «НТЦ Энергобезопасность» – подведомственной организации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году были выполнены предварительные оценки возможной уязвимости гидротехнических сооружений (далее – ГТС) гидроэлектростанций (далее – ГЭС), находящихся в эксплуатации, при землетрясениях. Сейсмические условия определялись по картам сейсмического районирования, на которых приводится информация о фоновой сейсмичности территорий. Для ГТС ГЭС принималась карта ОСР–97 С, которая была действующей в это время.

В зонах высокой сейсмичности (7 и более баллов) размещено 187 ГЭС различного типа и различной мощности, при этом в зоне с сейсмичностью района 8 баллов и выше размещено 129 ГЭС. Эти ГЭС расположены в следующих регионах: Кабардино-Балкарская Республика, Камчатский край, Краснодарский край, Республика Дагестан, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Северная Осетия-Алания, Ставропольский край.

Согласно полученной информации о размещении ГТС ГЭС на территории Российской Федерации можно заключить, что обеспечение безопасности ГТС при землетрясениях и связанных с землетрясениями процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения является актуальной задачей.

### **Общая информация о гидротехнических сооружениях на гидроэлектростанциях**

В настоящее время в Российской Федерации многие ГТС ГЭС находятся в эксплуатации длительное время. Гидроэлектростанция является составной частью гидроузла – комплекса гидротехнических сооружений, объединенных по расположению и совместному функционированию. Гидротехнические сооружения ГЭС – плотины, здания гидроэлектростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники и другие сооружения.

Гидроэлектростанции в России имеют большое разнообразие компоновочных решений: русловые, приплотинные, деривационные, гидроаккумулирующие. Проектно-конструкторские решения ГТС ГЭС также разнообразны: бетонные арочные, бетонные гравитационные, бетонные гравитационного типа с расширенными швами, бетонные массивно-контрфорсные, каменно-набросные, земляные насыпные, земляные намывные плотины.

Существенными факторами эксплуатации ГТС ГЭС являются уникальные условия их размещения на водных объектах, на равнине и в ущельях, на сложных грунтах, на вечной мерзлоте, на территориях возможных внешних воздействий природного и техногенного происхождения, в том числе сейсмической опасности. В ряде случаев ГЭС входят в состав каскадов ГЭС, функционирующих на взаимосвязанных водных объектах.

Таким образом, ГТС ГЭС разных конструктивных решений представляют собой сложные технические системы, включающие комплекс систем и элементов, характеризующихся особенными внутренними связями и зависимостями, системами управления технологическими процессами, различными техническими состояниями объектов. Они требуют индивидуального подхода в части выполнения конкретных оценок безопасности и сейсмостойкости на этапах жизненного цикла, в том числе на этапе эксплуатации.

### **Об обеспечении сейсмостойкости ГТС ГЭС**

Большинство из находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС проектировались много лет назад без учета сейсмических воздействий, так как не было требований по обеспечению их сейсмостойкости в нормативных документах. Это не означает, что ГТС ГЭС являются не сейсмостойкими. Как правило, для условий среднего уровня сейсмичности (5-7 баллов по шкале MSK-64) существующие конструктивные решения бывают в основном достаточны для обеспечения безопасности. Встаёт вопрос – всегда ли следует добиваться приведения технического состояния ГТС ГЭС - объекта, находящегося в эксплуатации длительное время, размещённого в зонах сейсмической опасности 7 – 9 баллов, в соответствие с современными требованиями сейсмостойкости, установленными в нормах [1, 2, 3].

С одной стороны, объект безопасно эксплуатируется уже длительный срок, оставшийся срок эксплуатации сокращается с каждым годом, в то время как сейсмические мероприятия потребуют инвестирования средств в таком объёме, как если бы этот объект проектировался в сейсмостойком исполнении с самого начала. С другой стороны, не придавать этому факту достаточного внимания также не имеется оснований. В любом случае необходимо иметь достаточную информацию, чтобы оценить существующую ситуацию и выработать оптимальный подход к решению проблемы обеспечения сейсмостойкости ГТС (без лишних затрат и не во вред безопасности).

ГЭС не выполняются по типовым проектам, поэтому накопить практический опыт по значениям допустимых сроков службы ГТС ГЭС также трудно, особенно при разных условиях их размещения. Понятно, что ресурс ГТС, его систем и элементов сокращается с каждым годом, также снижается его запас устойчивости к сейсмическим воздействиям. Поэтому, чтобы управлять сроком эксплуатации ГТС в условиях повышенной и высокой сейсмичности территории их размещения необходимо иметь реальные сведения о техническом состоянии ГТС и о фактических характеристиках сейсмической опасности. Для этого изучается исходная проектная документация, определяется степень соответствия проектных параметров и физического состояния ГТС современным критериям безопасности и решается вопрос о сохранении существующего сооружения, опять же с учётом экономической целесообразности приведения его в соответствие современным критериям безопасности и сейсмостойкости, либо о его консервации или ликвидации.

Одним из способов получения достаточной информации является использование метода оценок сейсмического риска. Однако его применение требует кроме наличия надёжной исходной базы данных, методов анализа, расчетных программных средств, также проведение анализа надёжности и сейсмостойкости практически всех ГТС, их систем и элементов.

### **Международный опыт**

Неопределенность данных о количестве, размерах и местоположении будущих землетрясений инженеры выражают через сейсмический риск в виде функции периодов повторяемости землетрясений [4].

Швейцарские специалисты считают, что существующие риски для гидросооружения могут быть минимизированы, но никогда не исключены полностью, даже если плотина спроектирована и сооружена в соответствии с новейшим уровнем знаний в данном вопросе [5]. Именно поэтому, по мнению швейцарских специалистов [5, 6], необходимо своевременно выявлять и определять любые признаки аномального поведения, повреждений, недостатков в безопасности гидросооружений, а также выявлять новые виды потенциальных угроз и дефициты безопасности на ранних стадиях эксплуатации сооружения с тем, чтобы своевременно принимать корректирующие меры. В числе основных факторов, влияющих на срок службы ГТС, являются изменения проектных критериев (главным образом, касающихся гидрологической и сейсмической безопасности), которые вносятся как результат накопления новой информации, полученной с момента разработки первоначального проекта плотины.

В число других факторов, которые снижают ресурс безопасной эксплуатации при землетрясениях, входят старение строительных конструкций, материалов и элементов основания плотины по причине химических процессов, физических и механических процессов, биологических процессов, фильтрации в основании. Однако определить надёжно запасы ресурса комплекса ГТС ГЭС на его эксплуатацию за длительный период, по мнению швейцарских ученых, не представляется возможным. По их мнению, этот вопрос должен решаться путём периодической оценки на основе пошагового анализа.

В ряде стран, например, в Швейцарии для проектов гидросооружений принято использовать комплексную концепцию интегральной безопасности [5, 6]. Основными целями применения данной концепции являются: минимизация всех возможных рисков и учёт остаточного риска наилучшим образом из всех возможных, и при этом – принятие мер реагирования в случае возникновения нештатных ситуаций. Согласно этой комплексной концепции, интегральная безопасность включает в себя четыре наиболее значимых элемента: конструкционная безопасность; мониторинг состояния безопасности плотины; эксплуатационная безопасность и техническое обслуживание; противоаварийное планирование. При этом советуют критерии проектирования и саму концепцию проекта периодически пересматривать с тем, чтобы убедиться, что безопасность сооружения по-прежнему гарантирована с точки зрения современного понимания безопасности и с учетом накопленных сведений о возможных сейсмических воздействиях и о техническом состоянии самого объекта.

### **О прогнозе землетрясений**

В условиях эксплуатации в зонах повышенной сейсмической опасности прогноз сейсмостойкости и продолжительности безопасной эксплуатации ГТС ГЭС также затруднителен по причине недостаточной надёжности прогноза землетрясения. Несмотря на проводимые научные исследования предсказать землетрясение с соответствующей степенью достоверности сложно. Землетрясения, которые произошли в мире в последние годы, были предсказуемы, но время их возникновения, возможный очаг землетрясения, глубина его нахождения, магнитуда в очаге землетрясения, интенсивность сейсмических колебаний в эпицентре и в соответствующих точках на поверхности земли на территориях, куда «дошли» колебания, в местах размещения объектов гражданского строительства, критически важных объектов промышленности, объектов социальной сферы, электроэнергетики, гидроузлов в основном спрогнозировать заблаговременно не удаётся.

Надёжного способа предвидеть это явление природы не существует, хотя над проблемой издавна работают ученые многих стран. Например, если толчки произошли где-то на большой глубине, то на поверхности они могут практически не ощущаться или быть слабыми. И наоборот, когда очаг землетрясения находится где-то близко к поверхности земли, то толчки гораздо меньшей магнитуды на поверхности могут ощущаться сильнее, а последствия их могут быть разрушительными. Очаг землетрясения в самом обобщенном виде описывается таким параметром, как магнитуда. Волна от очага распространяется во все стороны, вызывая сотрясения на поверхности Земли. Их интенсивность оценивается по 12-балльной шкале: американские сейсмологи используют шкалу Меркалли, российские — шкалу MSK-64, в Европе – EMS-98. Все они, в принципе, близки. Магнитуда (а именно эту шкалу придумал Чарльз Рихтер) применяется для оценки силы землетрясения в очаге по выделившейся в виде сейсмических волн энергии. Это безразмерная величина вычисляется как логарифм от количественных показателей землетрясения [7].

При описании крупных землетрясений применяют моментную магнитуду. Она основана на сейсмическом моменте, который характеризует вызванные землетрясением деформации в зоне тектонического разрыва. Тектонические процессы приводят к землетрясениям. Долгосрочные прогнозы, которые оперируют промежутками в десятки и сотни лет, ученые делать умеют. Если где-то однажды было землетрясение большой силы, логично предположить, что оно может случиться вновь. Этот принцип является основой для составления карт сейсмического районирования [2]. На основании этих карт разрабатываются нормы сейсмической устойчивости для зданий и сооружений. Но для каждого конкретного случая необходимо проводить геологические и сеймотектонические исследования, проверять реакцию грунта на нагрузку. В результате

можно получить оценку того, какие сейсмические движения можно ожидать на площадке размещения объекта. Могут быть и среднесрочные прогнозы — они предсказывают, какие землетрясения могут произойти в интервале от года до десятилетия. Но их точность не слишком велика. Поэтому всегда необходимо иметь дополнительные геофизические данные, которые могли бы служить индикаторами приближающегося события, способствовали предсказывать место, время, магнитуду прогнозируемого события с достаточной степенью надёжности, а ошибки предсказаний должны быть минимальными, время реализации события достоверным. Каждое землетрясение уникально, даже те, которые происходят в одном и том же месте в разные годы, потому что геологическая среда в сейсмоактивной зоне после любого толчка перестраивается, а как именно — это можно узнать только по результатам изысканий.

Изложенная выше информация свидетельствует о том, что для снижения уязвимости ГТС ГЭС при землетрясении необходимо принимать заблаговременные меры.

### **Методы прогноза параметров сейсмических воздействий**

Как уже отмечалось выше, прогноз сейсмических воздействий является важной составляющей анализа сейсмостойкости сооружений.

Для определения сейсмических воздействий может быть использован любой из перечисленных ниже методов (подходов) или их комбинаций, которые можно объединить в три основные группы [7]:

А. Методы, использующие записи сильных землетрясений максимального расчетного уровня, имевших место на площадке, или имеющиеся аналоговые записи сильных землетрясений.

Б. Методы, основанные на моделях разлома:

- теоретический метод;
- полуэмпирический метод.

В. Методы, использующие стандартные спектры:

- методы синтеза (моделирования, генерации) расчетных акселерограмм и спектров реакций с установленными оценками параметров движений грунта при расчетных воздействиях во временной или (и) спектральной форме.

В целом сейсмические воздействия в зависимости от степени изученности сеймотектонических и грунтовых условий площадки, наличия информации об истории землетрясений в этом регионе, полноты информации могут быть определены любым из методов или несколькими методами одновременно: нормативным, эмпирическим, полуэмпирическим и аналитическим. Применимость каждого из использованных методов должна быть обоснована в приложениях к конкретной задаче. Но должны быть получены наиболее вероятные значения параметров сейсмических воздействий с оценкой их неопределённости. Исходные акселерограммы должны быть отобраны, модифицированы, либо получены численными методами таким образом, чтобы их временные параметры (длительность акселерограмм, огибающая колебаний) и амплитудные параметры (пиковое ускорение, пиковая скорость, пиковые перемещения) соответствовали тем, которые определены для площадки по ее макросейсмическим характеристикам на основе анализа взаимодействия грунта и сооружения.

Наиболее распространенным подходом к моделированию взаимодействия сооружений с грунтом является применение подхода «платформенная модель», при котором сейсмическое воздействие подается на жесткую платформу, на которой с помощью некоторого подвеса закреплена модель сооружения. Подвес включает в себя распределенные пружины и демпферы. Преимущество «платформенной модели» заключается в том, что ее расчет можно проводить с помощью тех же программ, что и расчет сооружения на жестком основании.

## **О комплексном подходе при проведении оценок сейсмостойкости**

Можно согласиться с автором работы [5], что соответствие ГТС проектной документации, выпущенной в предшествующий период, не является обоснованием его безопасности и сейсмостойкости. При продлении срока службы ГТС его остаточный ресурс должен определяться с учётом современных требований по обеспечению безопасности и новых данных о сейсмической опасности, данных об изменении гидрологических режимов, других внешних воздействиях с учетом тенденций изменения климата, результатов визуальных осмотров и иных обследований, измерений и расчетов.

В [8] обосновывается важность применения комплексного подхода к анализу и обеспечению сейсмостойкости объектов энергетики. Это относится также к ГТС на всех этапах их жизненного цикла с учетом изменяющихся свойств их систем, элементов, конструкций.

Комплексный подход к исследованию сейсмостойкости сооружений и конструкций может быть представлен в виде четырёх основных этапов:

- определение исходных параметров колебаний грунта на площадке размещения ГЭС.
- анализ взаимодействия грунтов и сооружений (конструкций).
- динамический анализ параметров колебаний узлов и элементов сооружений (конструкций) для разных уровней (отметок) их нахождения в сооружении.
- сейсмический анализ прочности (устойчивости) сооружений (конструкций), зданий ГЭС, их систем и элементов, механического оборудования.

Для проведения оценок сейсмостойкости систем и элементов, входящих в состав плотин, сооружений, конструкций, здания ГЭС и расположенных на разных уровнях относительно основания сооружения, необходимо использовать поэтажные акселерограммы, полученные с применением динамического анализа параметров колебаний сооружения (частот и форм собственных колебаний, скоростей, перемещений).

## **О современной нормативной базе, применимой для ГТС ГЭС**

Как уже отмечено ранее в настоящей статье, можно себе позволить утверждать, что нормативной базы по обеспечению сейсмостойкости гидротехнических сооружений не было в России, как и за рубежом. В 1997 году была введена в действие Общая карта сейсмического районирования России ОСР-97. Начиная с 2000-х годов разрабатывается и совершенствуется нормативная база в Российской Федерации, устанавливающая положения, обязательные требования и рекомендации для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений, включая гидротехнические сооружения. Согласно изложенным в законодательных и иных нормативных правовых актах, стандартах Российской Федерации положениям и требованиям необходимо осуществлять прогноз и оценки сейсмических воздействий, выбор методов расчета, оценки взаимодействия сооружений с основанием, оценки сейсмостойкости ГТС, иных сооружений и конструкций.

В статье 9 Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (далее – Федеральный закон № 384-ФЗ) [1] установлено, что «здание или сооружение на территории, на которой возможно проявление опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, должно быть спроектировано и построено таким образом, чтобы в процессе эксплуатации здания или сооружения опасные природные процессы и явления и (или) техногенные воздействия не вызывали последствий», указанных в статье 7 Федерального закона № 384-ФЗ, и (или) иных событий, создающих угрозу причинения вреда жизни или здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или

муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.»

В пунктах 12 и 25 статьи 9 Федерального закона № 384-ФЗ приводится перечень опасных природных процессов и явлений, техногенных воздействий; в пункте 26 определяется, что требования безопасности обеспечиваются в соответствии с уровнем ответственности (характеристикой) здания или сооружения, определяемым в соответствии с объемом экономических, социальных и экологических последствий его разрушения.

Согласно [2] интенсивность сейсмических воздействий в баллах (фоновая сейсмичность) для района строительства следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015), утверждённых Российской Академией Наук (этот комплект карт был введен взамен комплекта карт ОСР-97). Комплект карт ОСР-2015 предусматривает осуществление антисейсмических мероприятий при строительстве объектов и отражает 10%-ную — карта А, 5%-ную — карта В, 1%-ную — карта С вероятности возможного превышения (или 90%-ную, 95%-ную и 99%-ную вероятности непревышения) в течение 50 лет указанных на картах значений сейсмической интенсивности.

Как уже отмечалось ранее в настоящей статье, предсказание максимально ожидаемых магнитуд землетрясений в определённом районе, в том числе на основе результатов статистической обработки инструментальных сейсмических наблюдений за землетрясениями до начала строительства принципиально невозможно, поскольку продолжительность инструментальных исследований на несколько порядков меньше необходимого для этой цели времени. Поэтому раскрытие неопределенностей всегда носит экспертный характер.

В [2] устанавливаются требования для ГТС, размещаемых или расположенных в районах с нормативной сейсмичностью, равной 6 баллам и более по карте С (со средним периодом повторяемости воздействия один раз в 5000 лет), действующего комплекта карт ОСР-2015. Там же в п. 4.2 изложены требования для обеспечения сейсмостойкости проектируемых, строящихся и эксплуатируемых ГТС. Указывается на необходимость выполнения комплекса расчетов по оценке прочности и устойчивости сооружений и их элементов с учетом взаимодействия ГТС с основанием и водохранилищем; применения конструктивных решений и материалов, повышающих сейсмостойкость ГТС; установления исходной и расчетной сейсмичности площадки строительства, наличия опасных процессов и явлений, которые могут реализоваться по причине колебаний грунта в процессе землетрясения на территории, определения расчетных сейсмических воздействий, получение при необходимости набора акселерограмм для этих воздействий; проведения в процессе эксплуатации сооружения мониторинга опасных геодинамических явлений; обследования состояния ГТС и их оснований после каждого перенесенного землетрясения интенсивностью 5 баллов и более. Достаточно полный список проблем, задач и работ, которые следует принимать во внимание и которые необходимо учитывать и выполнять.

Согласно п. 4.3. [2] устанавливаются два уровня сейсмических воздействий. Это уровень максимального расчетного землетрясения (МРЗ) и уровень проектного землетрясения (ПЗ). При этом ГТС должны воспринимать МРЗ без угрозы собственного разрушения, без угрозы прорыва напорного фронта. Сейсмические воздействия уровня ПЗ должны восприниматься ГТС без угрозы для жизни и здоровья людей и с сохранением собственной ремонтпригодности. При этом допускаются остаточные смещения, деформации, трещины и иные повреждения. Устанавливается требование использовать карту ОСР-С (повторяемость 1 раз в 5000 лет) при расчете на МРЗ водоподпорных сооружений классов I, II и III; ОСР-В (повторяемость 1 раз в 1000 лет) - при расчете на МРЗ водоподпорных сооружений класса IV и безнапорных ГТС; ОСР-А (повторяемость 1 раз в 500 лет) - при расчете на ПЗ ГТС всех классов и видов.



Как уже отмечено выше, для определения нормативной сейсмичности района строительства необходимо использовать действующую систему нормативных карт А, В, С ОСР- 2015.

Для проектных основ исходную сейсмичность площадки размещения ГТС для МРЗ и ПЗ рекомендуется определять по результатам детального сейсмического районирования (далее – ДСР). При этом должна быть составлена сеймотектоническая модель сейсмического района расположения объекта, содержащая карту основных зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) с параметрами сейсмических воздействий (максимальные магнитуды, глубины очагов и эпицентральные расстояния, повторяемость землетрясений).

В случаях, когда нормативная сейсмичность района для требуемого периода повторяемости превышает 9 баллов, исходную сейсмичность площадки ГТС независимо от вида и класса ГТС следует определять на основе ДСР.

Согласно [2] сейсмические воздействия следует учитывать в тех случаях, когда значение величины сейсмического воздействия составляет 7 баллов и более для уровня МРЗ. Оценку прочности и устойчивости для всех сооружений проводить со значением коэффициента надежности по ответственности сооружения, равное 1,10.

При расчете сооружения на действие ПЗ в особое сочетание нагрузок и воздействий включают нагрузку от сейсмического воздействия интенсивностью, отвечающей ПЗ. Изложенные в [2] обязательные требования применяются для зданий и сооружений. Они также распространяются на гидротехнические сооружения разного назначения.

В Градостроительном кодексе Российской Федерации (далее - ГК РФ) приводится список объектов, которые могут относиться к особо опасным, технически сложным или уникальным объектам. Согласно ГК РФ к технически сложным объектам относятся ГТС первого и второго классов ответственности.

В СП 58.13330.2019. «Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003» [3] содержатся дополняющие положения в отношении ГТС, изложенные в [2]. Устанавливается, что расчет сейсмостойкости напорных ГТС, класс которых определен в зависимости от их социально-экономической ответственности и условий эксплуатации согласно [3], допускается, при надлежащем обосновании, выполнять на уровне сейсмических воздействий методами, соответствующими классам, определенным для этих ГТС в зависимости от их высоты и типа грунтов оснований. Для проведения расчетов сейсмостойкости ГТС необходимо применять метод динамического анализа (линейный или нелинейный) и линейно спектральный метод. Устойчивость ГТС и их оснований с учетом сейсмических нагрузок следует проверять в соответствии с указаниями СП 23.13330.2018. «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений» [9] и СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [10].

В разделе 7 [3] приводятся требования по повышению сейсмостойкости ГТС, которые имеют конструктивный характер, при проектировании и строительстве ГТС.

Гидротехнические сооружения, их конструкции и основания, как правило, проектируются таким образом, чтобы условие недопущения наступления предельных состояний соблюдалось на всех этапах их строительства и эксплуатации, в том числе и в конце назначенного срока их службы. В соответствии с СП 58.13330.2019 [3] проектный срок службы ГТС определен продолжительностью 100 лет для ГТС первого и второго классов ответственности. Для ГТС третьего и четвертого классов ответственности срок службы составляет 50 лет. Но как отмечалось выше, такой подход к определению проектного срока службы является прогнозным. Существует множество неопределённостей, которые не обеспечивают уверенность в назначенных сроках службы, не только при реализации МРЗ, но и при ПЗ. Как уже отмечалось выше,

продолжительность сроков службы в 100 лет и 50 лет в зависимости от класса ответственности установлены в 2014 году, когда большинство ГТС уже находились на этапе эксплуатации.

Для повышения сейсмостойкости эксплуатируемых плотин, «имеющих дефицит сейсмостойкости» [3], рекомендуется уширение поперечного профиля плотины в ее нижней части; облегчение верхней части сооружений за счет применения оголовков минимальной массы, устройства верхней части сооружения в виде стенки, контрфорсной или рамной конструкции, выполнения полостей в пригребневой зоне сооружения и т.д.; применение пространственно работающих массивных гравитационных плотин. На этапе эксплуатации требуется проводить сейсмологический мониторинг на ГТС в соответствии с СП 358.1325800.2017 «Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах» [11].

В [3] предусматривается необходимость на напорных гидротехнических сооружениях I класса ответственности, расположенных в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на сооружениях II класса ответственности в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше по шкале MSK-64, проводить специальные наблюдений и испытания. Должны проводиться инженерно-сейсмометрические наблюдения за работой сооружений и береговых примыканий (сейсмометрический мониторинг); инженерно-сейсмологические наблюдения в зоне ложа водохранилища вблизи створа сооружений и на прилегающих территориях (сейсмологический мониторинг); определение динамических характеристик гидротехнических сооружений с составлением динамического паспорта. При необходимости должны быть организованы наблюдения за вибрацией сооружений, сейсмическими нагрузками на них, прочностью и водонепроницаемостью бетона, напряженным состоянием и температурным режимом конструкций, коррозией металла и бетона, состоянием сварных швов металлоконструкций, выделением газа на отдельных участках гидротехнических сооружений и др. При изменениях условий эксплуатации гидротехнических сооружений, способных привести к снижению их надежности, должны проводиться наблюдения по дополнительным программам.

В пунктах 7.1, 7.2, 7.3 [3] устанавливаются требования к реконструкции постоянных ГТС, в которых предусматривается проведение компенсирующих мер по снижению последствий старения сооружений, по учету изменения внешних воздействий, по повышению сейсмичности. А в пунктах 7.7 – 7.12 устанавливаются обязательные требования к консервации или ликвидации ГТС.

В разделе 8 [3] устанавливаются требования к обоснованию надежности и безопасности гидротехнических сооружений. В их составе требования к выполнению расчетов напряженно-деформированного состояния системы "сооружение-основание" на основе применения современных, главным образом численных, методов механики сплошной среды с учетом реальных свойств материалов и пород оснований. При этом устанавливаются две группы предельных состояний и требования, что учет сейсмических воздействий необходимо выполнять по СП 14.13330.2019, СП 38.13330.2018 и СП 358.1325800 [2, 10, 11].

В пункте 8.21 [3] установлено требование о необходимости предупреждения наступления предельных состояний на всех этапах строительства и эксплуатации, в том числе и в конце расчетного срока их службы. При этом допускается применение вероятностного анализа для обоснования принимаемых технических решений системы «сооружение-основание» (пункт 8.24), в первую очередь ГТС, которые относятся к основным сооружениям. В зависимости от возможного ущерба при разрушении и при соответствующем обосновании второстепенные сооружения допускается относить к основным сооружениям.

В [3] приводятся списки постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок и воздействий (Г.1) и особых нагрузок и воздействий (Г.2). В состав особых нагрузок и воздействий входят сейсмические воздействия, динамические воздействия от взрывов, гидродинамические и взвешивающие воздействия, обусловленные цунами. Землетрясения практически всегда связаны с последующей реализацией по их причине опасных природных и техногенных воздействий на территории объекта и рядом с ним [7].

Согласно действующей нормативной базе, должны регулярно проводиться оценки безопасности и сейсмостойкости по мере поступления новых данных изысканий по условиям размещения ГТС ГЭС; оценки надёжности эксплуатации водохранилища при нормальных и чрезвычайных гидрологических условиях; обучение персонала действиям в условиях чрезвычайных ситуаций; техническое обслуживание ГТС, всех конструкций и компонентов и т.д.

Краткий обзор актуальной (действующей в последние годы) нормативной базы показывает, что на настоящем этапе обязательных требований достаточно, но в результате рассмотрения положений, действующих нормативных правовых актов, можно сделать заключение, что нормативная база в основном направлена на проектирование и строительство новых гидроузлов. А для реализации требований по обеспечению сейсмостойкости для находящихся в эксплуатации ГТС, потребуются значительные усилия эксплуатирующих организаций, в том числе значительные финансовые и трудовые ресурсы квалифицированных специалистов.

### **О развитии нормативной базы для применения на эксплуатируемых гидротехнических сооружениях**

Как уже отмечено выше, в зоне высокой сейсмической опасности расположено значительное число находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС. Поэтому необходимо осуществлять работы по оценкам сейсмостойкости, находящихся в эксплуатации комплексов ГТС ГЭС, на регулярной основе, чтобы не допустить потери их устойчивости при землетрясениях. И для этих целей необходимо обеспечить нормативными требованиями процесс управления безопасностью ГТС, находящихся в эксплуатации в зонах сейсмической опасности.

Эксплуатирующей организацией проводится деятельность по ослаблению повреждающих факторов на ГТС ГЭС. Выполняются на периодической основе разработки деклараций безопасности комплексов ГТС ГЭС и их экспертизы независимыми экспертными организациями. Однако на этих этапах практически сложно делать надёжные прогнозы о продолжительности их безопасной эксплуатации, особенно в зонах сейсмического риска.

Существенная роль должна отводиться проведению работ и оценок по подтверждению сейсмостойкости ГТС, определению и оптимизации мероприятий по их защите от внешних воздействий, которые ассоциируются с землетрясениями. Для управления безопасностью ГТС ГЭС актуальной является задача по минимизации всех рисков основываясь на системном анализе с использованием вероятностных и детерминистических методов, результатах измерений, расчетных исследований. При этом необходимо делать заключения о сейсмостойкости ГТС ГЭС и определять предельные сроки службы комплекса ГТС ГЭС, особенно при наличии угрозы возможного землетрясения 7 и более баллов.

Необходимо оценить деятельность по обеспечению непрерывности безопасной эксплуатации ГТС ГЭС, уже находящихся в эксплуатации, на длительную перспективу, а также являются ли достаточными положения и требования, содержащиеся в действующих

нормативных правовых актах [1, 2, 3] по управлению последствиями землетрясений на ГТС и территориях рядом с ними.

### Заключение

До тех пор, пока может быть гарантировано надлежащее решение вопросов безопасности на находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС сооружения могут противостоять нагрузкам от землетрясения.

Обеспечение сейсмостойкости, находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС, предполагает проведение комплекса работ. При этом надежность изысканий, исследований, расчетов и испытаний должна контролироваться в отношении всех работ, входящих в состав комплекса работ.

Как уже отмечено выше в настоящей статье, для обеспечения сейсмостойкости ГТС, находящихся на этапе эксплуатации, получить надёжные прогнозы их сейсмостойкости практически нереально. Отсутствует надёжная информация по наличию остаточного ресурса на обеспечение устойчивости ГТС при землетрясениях.

Поэтому возникает вопрос о том, как долго можно продолжать безопасно эксплуатировать комплексы ГТС ГЭС, находящиеся длительное время в эксплуатации, как можно управлять сроком безопасной эксплуатации ГТС ГЭС, если существует опасность реализации землетрясения.

Поэтому требуется формирование системного подхода по управлению безопасностью, находящихся в длительной эксплуатации комплексов ГТС ГЭС, с целью противостоять воздействиям от землетрясений и связанных с ними ассоциаций внешних воздействий природного и техногенного характера.

В работах [5, 6] для проектов гидросооружений принято использовать комплексную концепцию интегральной безопасности. Для ГТС Российской Федерации также целесообразно рассмотреть подход зарубежных специалистов и разработать нормативный правовой акт, содержащий концепцию интегральной безопасности ГТС, находящихся в эксплуатации при землетрясениях, с комплектом методических рекомендаций. Использование этого нормативного правового акта позволит управлять безопасностью комплекса ГТС, находящихся в длительной эксплуатации, при реализации землетрясения.

### Список литературы

1. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
2. СП 14.13339.2018 «СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах». Москва: Минстрой РФ; 2018.
3. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003». Москва: Стандартинформ; 2020.
4. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606.
5. Wieland M. Life-span of storage dams, *Water Power and Dam Construction*, 2010.
6. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems, *Water Power and Dam Construction*, 2009.
7. Калиберда И.В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Безопасность объектов использования атомной энергии. Москва: Логос. 2002. 544 с.
8. Калиберда И.В. Обеспечение сейсмостойкости объектов энергетики. *Безопасность труда в промышленности*. 2011. № 5. С. 26–35.

9. СП 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений». Москва: Росстандарт; 2018.
10. СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Москва: Росстандарт; 2018.
11. СП 358.1325800.2017 «Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах». Москва: Стандартинформ; 2018.

## References

1. Federal'nyj zakon ot 30 dekabrya 2009 g. No. 384-FZ «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij». [In Russian]
2. SP 14.13339.2018 «СНиП II-7-81\* Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah». Moscow: Minstroy RF; 2018. [In Russian]
3. SP 58.13330.2019. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya. SNiP 33-01-2003». Moscow: Standartinform; 2020. [In Russian]
4. Sornell C.A. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 1968, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606.
5. Wieland M. Life-span of storage dams, Water Power and Dam Construction, 2010.
6. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems, Water Power and Dam Construction, 2009.
7. Kaliberda I.V. Otsenka parametrov vneshnih vozdeystvij prirodnoho i tekhnogennoho proiskhozhdeniya. Bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoj energii. Moscow: Logos. 2002. 544 p. [In Russian]
8. Kaliberda I.V. Obespechenie sejsmostojkosti ob"ektov energetiki. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2011, no. 5, pp. 26–35. [In Russian]
9. SP 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85 Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». Moscow: Rosstandart; 2018. [In Russian]
10. SP 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82\* Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)». Moscow: Rosstandart; 2018. [In Russian]
11. SP 358.1325800.2017 «Sooruzheniya gidrotekhnicheskie. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva v sejsmicheskikh rajonah». Moscow: Standartinform; 2018. [In Russian]

## Информация об авторах

**Калиберда Инна Васильевна**, доктор технических наук, научный руководитель. ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность». Москва, Российская Федерация  
e-mail: [Kaliberdajob@mail.ru](mailto:Kaliberdajob@mail.ru)

**Kaliberda Inna V.**, Dr. Sci. (Engineering), Scientific Leader. Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”. Moscow, Russian Federation

**Пименов Владимир Иванович**, кандидат технических наук, начальник отдела. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, Российская Федерация  
e-mail: [V.Pimenov@gosnadzor.gov.ru](mailto:V.Pimenov@gosnadzor.gov.ru)

**Pimenov Vladimir I.**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Moscow, Russian Federation