

С. В. ЕВДОКИМОВ**А. А. ОРЛОВА**

АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ ВОЗМОЖНОГО РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

ANALYSIS OF SCENARIOS OF POSSIBLE DEVELOPMENT OF EMERGENCY SITUATIONS AT HYDRAULIC STRUCTURES

Приводятся и анализируются возможные сценарии развития аварийно-катастрофических событий на строящихся и эксплуатируемых гидротехнических сооружениях. Как известно, при определении вероятности развития катастрофической ситуации на конкретном гидротехническом сооружении необходимо произвести идентификацию всех опасных факторов как природного, так и техногенного характера. Комплексное действие этих факторов следует рассматривать в районе расположения данного гидротехнического сооружения как на стадии его проектирования, строительства, так и на стадии эксплуатации. Эта задача на сегодняшний день является весьма актуальной из-за участившихся аварий и чрезвычайных ситуаций, возникающих на сооружениях подобного рода. Анализ предполагаемого сценария аварийно-катастрофического развития событий на уже эксплуатируемых гидротехнических сооружениях позволит спрогнозировать на основе проводимого исследования в первую очередь причины возникновения, а также характер критических повреждений гидротехнических сооружений и вероятность возникновения как самой аварийно-катастрофической ситуации, так и гидродинамической аварии. В статье рассмотрено три характерных сценария развития аварийной ситуации, приведены алгоритмы аварий по данным сценариям и сформулированы выводы по вероятности возникновения аварийной ситуации для конкретного гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: природно-техногенные факторы, человеческий фактор, гидротехнические сооружения, анализ аварийной ситуации, чрезвычайная ситуация, сценарий развития событий, опыт эксплуатации, конструктивные особенности, земляная конструкция

The article presents and analyzes possible scenarios for the development of accident-catastrophic events on hydraulic structures under construction and in operation. As it is known at definition of probability of development of catastrophic situation on concrete hydraulic structure it is necessary to make identification of all dangerous factors, both natural, and technogenic character. The complex action of these factors should be considered in the area of location of a given hydraulic structure, both at the stage of its design, construction and operation. This task, to date, is very relevant because of the increasing frequency of accidents and emergencies arising at structures of this kind. The analysis of the assumed scenario of accident-catastrophic development of events on already operated hydraulic structures, will allow to predict on the basis of the ongoing research, first of all, the causes of occurrence, as well as the nature of critical damage to hydraulic structures and the probability of occurrence, as the accident-catastrophic situation and hydrodynamic accident. The article considers three characteristic scenarios of emergency situation development, gives algorithms of accidents according to these scenarios and formulates conclusions on the probability of emergency situation for a particular hydraulic structure.

Keywords: natural-technogenic factors; human factor; hydraulic structures; analysis of emergency situation; emergency situation; scenario of events development; operating experience; constructive features; earthen construction

Согласно Методическим указаниям, утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 516 от 10.12.2020 г. по расчету определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических

лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения, определяющими факторами для подсчета размера вероятного вреда являются: показатели результата расчета параметров зон аварийного воздействия при наиболее тяже-

лых и наиболее вероятных авариях гидротехнических сооружений; сведения о возможной вероятности прогнозируемых сценариев возникновения аварий; расчетные значения величин негативных воздействий от аварий на гидротехнических сооружениях; предполагаемые сценарии реализации наиболее тяжелых и наиболее вероятных авариях гидротехнических сооружений, в которых имеют место быть данные о возможных зонах воздействия этих аварийных ситуаций. В соответствии с п. 21 гл. III Методических указаний при определении вероятности развития катастрофической ситуации на конкретном гидротехническом сооружении необходимо произвести идентификацию всех опасных факторов природного и техногенного характера. Комплексное действие этих факторов следует рассматривать непосредственно в районе расположения данного гидротехнического сооружения как на стадии его проектирования, строительства, так и на стадии эксплуатации. Эта задача на сегодняшний день является весьма актуальной из-за участившихся аварий и чрезвычайных ситуаций, возникающих на гидротехнических сооружениях [1, 2].

Анализ предполагаемого сценария и возможную вероятность аварийного развития ситуации на уже эксплуатируемых гидротехнических сооружениях, как известно, производят на основе исследования причин возникновения и характера критических повреждений гидротехнических сооружений, что позволит определить вероятность возникновения аварийной ситуации и спрогнозировать саму гидродинамическую аварию [3].

Если анализировать возможные сценарии развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях, то необходимо, в первую очередь, рассматривать следующие факторы:

а) местоположение, компоновка и конструктивные особенности эксплуатируемых гидротехнических сооружений;

б) оценка эксплуатационного состояния и уровня безопасности гидротехнических сооружений;

в) природно-климатические, топографические, инженерно-геологические, гидрогеологические и гидрологические условия районов расположения гидротехнических сооружений;

г) режимы эксплуатации гидротехнических сооружений;

д) характерные уровни водохранилища при весенних половодьях и летне-осенних паводков;

е) профессиональная подготовка службы эксплуатации, которая включает квалификацию эксплуатационного персонала;

ж) уровень организации натурных наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений;

з) оценка готовности эксплуатирующей организации по предупреждению, локализации и ликвидации последствий аварии на гидротехническом сооружении.

Как известно, основными причинами, влияющими на изменение класса безопасности в период эксплуатации такого гидротехнического сооружения, как плотина, являются [4, 5]:

- природно-опасные явления, к которым относят ветровые, волновые, ледовые, температурные и сейсмические воздействия;

- наличие техногенно-опасных факторов – автомобильных дорог и железнодорожных путей на территории действующего гидротехнического сооружения;

- проведение и производство буровзрывных работ;

- опасность возникновения и негативные последствия, которые могут возникнуть в самих гидротехнических сооружениях в результате изменения свойств материалов сооружений и их оснований, статические и динамические нагрузки, действующие на само гидротехническое сооружение и на его основание, а также вероятность возникновения суффозионных, деформационных и прочих негативных процессов в теле сооружений;

- человеческий фактор – ошибки проведения изыскательских работ, ошибки в проектировании и при строительстве, возможные непредвиденные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации конкретного гидротехнического сооружения.

Из опыта эксплуатации действующих гидротехнических сооружений можно с уверенностью сказать, что наиболее опасным сценарием развития аварийной ситуации является частичное или полное разрушение перегораживающего сооружения с потерей русловой ёмкости в верхнем бьефе и соответственно потерей водохранилищем своих функций. На основании данного сценария развития аварийной ситуации и производится расчет вероятного ущерба при прорыве гидротехнического сооружения [6–8].

Более подробно остановимся на анализе типовых сценариев развития и возникновения аварийных ситуаций на эксплуатируемых гидротехнических сооружениях, приведенных в действующих Методических указаниях. Имеющийся на сегодняшний день перечень типовых сценариев развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях можно применить только для основных видов гидротехнических сооружений, а это не в полной мере позволяет учесть все возможные особенности конкретных сооружений. Для этого целесообразно разработать и иметь более полный перечень основных сценариев возникновения и развития аварийных

ситуаций, а также их негативные воздействия и последствия, включающие все опасности, способные инициировать аварии рассматриваемого гидротехнического сооружения [9, 10].

Имеющиеся конструктивные особенности гидротехнических сооружений, которые проявляются в условиях эксплуатации на этапе проектного режима, а также проведенный анализ характерных причин возникновения аварий и их последствий позволяют спрогнозировать три характерных сценария развития аварийных ситуаций, влекущих за собой повреждение гидротехнических сооружений. Эти сценарии позволяют учесть такие факторы, как расположение и степень наполнения водохранилища, визуальное обследование местности расположения сооружений, имеющиеся статистические данные, характеризующие причины и последствия аварий на уже действующих гидротехнических сооружениях.

Попробуем проанализировать *первую модель* развития аварийной ситуации, вызванной несоответствием проведения строительных работ существующему плану, а также ошибками в технологии возведения гидротехнических объектов, что в итоге может привести к возникновению диспропорциональных деформирующих нагрузок в земляных конструкциях гидротехнических сооружений, например таких, как плотины и дамбы. В результате развития событий по этому сценарию могут происходить разломы на гребне конструктивных элементов, возможно появление сползающих участков на склонах конструкций, формироваться углубления и провалы ниже нормального подпорного уровня, возникновение прорывной волны, приводящей к полному осушению всего водохранилища, что в итоге вызывает наводнение и подтопление земель в нижнем бьефе гидротехнических конструкций.

По *второму сценарию* развития аварийной ситуации возможно разрушение напорного фронта сооружения, сопровождающегося образованием прорана, в который происходит излив воды, неконтролируемый персоналом гидротехнического сооружения. В этом случае также возможен неконтролируемый перелив через гребень плотины из-за переполнения водохранилища или возникновения экстремальных волн и, как следствие, уменьшение сечения оголовка водосбросного сооружения или его полного перекрытия в период паводка 1 %-й обеспеченности и более.

Третий сценарий развития аварийной ситуации сопряжен с возникновением заиливания и зарастания древесины отводящего канала паводкового водосброса, затоплением поврежденной дренажной системы низового откоса

плотины, насыщением водой низового откоса, подъемом пьезометрических уровней, образованием провалов, промоин и грифонов вдоль ходов суффозии и нор землеройных животных.

Если проанализировать представленные сценарии развития аварийных ситуаций с позиции имеющегося опыта эксплуатации гидротехнических сооружений в условиях Центрально-Европейской части Российской Федерации, то можно предположить следующее. Для действующих гидротехнических сооружений, расположенных на рассматриваемой территории, наиболее тяжелые последствия от гидродинамической аварии возможны при развитии событий по второму сценарию, однако наиболее вероятным развитием событий при возникновении гидродинамической аварии является первый сценарий.

Таким образом, анализ сценариев возможного развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях позволяет сформулировать следующие положения по трем сценариям развития событий.

При возникновении гидродинамической аварии по первому сценарию возможны следующие катастрофические последствия:

- неконтролируемый излив воды через проран;
- разрушение напорного фронта гидротехнического сооружения;
- образование зон затопления;
- полное опорожнение водохранилища.

Причинами развития аварий на гидротехнических сооружениях по первому сценарию, как правило, могут стать как риски природно-техногенного характера, так и человеческий фактор. Это и неравномерные деформационные нагрузки на грунтовые сооружения, такие как плотины и дамбы, вызванные несоответствием проведения строительных работ существующему плану, а также ошибками в технологии возведения гидротехнических объектов, что является основной причиной возникновения диспропорциональных деформирующих нагрузок в теле земляной конструкции. Это и многочисленные разломы по гребню конструктивных элементов; вероятность появления сползающих участков на склонах земляных конструкций; формирование углублений и провалов ниже нормального подпорного уровня; не исключена возможность возникновения прорывной волны, приводящей к полному осушению всего водохранилища, и, как следствие, наводнение и подтопление земель в нижнем бьефе гидротехнических сооружений. Велика вероятность, что в период сверхнормативного заполнения водохранилища, при загромождении водосбросного сооружения плавающим

древесным мусором и льдом, уровень воды в водохранилище может достигнуть отметки нормального подпорного уровня, что приведет к частичному разрушению плотины.

В самой конструкции плотины, а также в результате скрытых и возможных её дефектов, образовавшихся за период эксплуатации и одновременно не выявленных, может происходить активизация и усиление фильтрационных процессов в теле плотины, что станет в итоге прямой причиной возникновения аварийной ситуации.

Возможно разрушение элементов плотины с образованием прорана и образованием волны прорыва, с опорожнением водохранилища, затопление и подтопление нижерасположенных территорий.

В результате вышесказанного можно записать алгоритм аварии по первому сценарию следующим образом: постепенная деформация тела земляной конструкции → появление микротрещин на гребне с появлением оползневых участков на откосах сооружений → образование промоин и провалов в виде глубоких каналов, промытых водой, быстро увеличивающихся в размерах, особенно в случае прохождения фильтрации воды через трещины, которые образуются в теле сооружения ниже отметки нормального подпорного уровня → образование прорана, т. е. сквозного отверстия в теле плотины (на этом этапе процесс становится необратимым) → подтопление территории нижнего бьефа, размеры которого зависят от объема воды в водохранилище и рельефа местности → практически полное опорожнение водохранилища через образовавшийся проран, тем самым завершая процесс аварии. Возможность возникновения гидродинамической аварии по данному сценарию наиболее вероятна и может привести к чрезвычайной ситуации с тяжелыми катастрофическими последствиями.

Если рассматривать возможность возникновения гидродинамической аварии по второму сценарию, то могут наблюдаться следующие последствия развития событий. Повреждение водосбросного сооружения при уровне воды в водохранилище на отметке НПУ с неконтролируемым переливом воды через гребень плотины и с образованием прорана. Причинами развития аварий на гидротехнических сооружениях по второму сценарию могут стать как риски природно-техногенного характера, так и человеческий фактор.

Во время наступления периода весенних положительных температур возникает ситуация с наложением гидрометеорологических факторов, включающих интенсивное таяние накопленных в течение зимнего периода больших снеговых масс. Дополнительным негативным фактором, который может привести к резкому подъёму

паводковых вод, будет частичное или полное засорение водосбросного сооружения плавающим древесным мусором и льдом. В этом случае возможно событие, при котором водосбросное сооружение фактически перестанет работать, при этом эксплуатационная служба, в силу различных обстоятельств, не в состоянии исправить возникшую аварийную ситуацию.

На большинстве гидротехнических сооружений в период сверхнормативного заполнения водохранилища, при повреждении водосбросного сооружения или в результате перекрытия его плавающим древесным мусором и льдом, уровень воды в водохранилище достигнет отметки НПУ, произойдет перелив через водосбросное сооружение, головной регулятор магистрального канала и разлив в районе водосбросного сооружения. При дальнейшем повышении уровня воды в водохранилище произойдет перелив через гребень плотины, при этом на плотине образуется проран с образованием волны прорана и затопление территории под нижним бьефом [11].

Алгоритм аварии по второму сценарию будет следующим: засорение водосбросного сооружения → сверхнормативное наполнение водохранилища → частичное разрушение плотины → подтопление территории нижнего бьефа → опорожнение водохранилища.

Причинами развития аварии на гидротехнических сооружениях по третьему сценарию может стать только человеческий фактор.

Во время наступления периода весенних положительных температур происходит интенсивное таяние накопленных в течение зимнего периода больших снеговых масс. Из-за заиливания и зарастания древесной растительностью отводящего канала паводкового водосброса, затопления поврежденной дренажной системы низового откоса плотины происходит насыщение водой низового откоса, подъем пьезометрических уровней, образование провалов, промоин и грифонов вдоль ходов суффозии и нор землеройных животных [12].

Такое развитие событий по третьему сценарию можно записать в виде следующего алгоритма: наступление весеннего таяния снега → затопление дренажного канала → насыщение водой низового откоса, подъем пьезометрических уровней → образование провалов, промоин и грифонов вдоль ходов суффозии и нор землеройных животных.

Подведя итог вышесказанному, можно заключить, что наиболее возможными расчетными сценариями развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях можно считать *первый и второй сценарии*. Причем первый сценарий следует рассматривать как

наиболее вероятное развитие аварийных ситуаций, а второй – как наиболее тяжелый и катастрофический сценарий развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.

2. Бальзанников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119–124.

3. Леонов О.В., Романов А.А., Евдокимов С.В. Анализ сейсмических условий района расположения Жигулёвской ГЭС // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 109–114.

4. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2012. № 1. С. 49–53.

5. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Критерии оценки надежности и технического состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 105–109.

6. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.

7. Бальзанников М.И., Родионов М.В., Сеницкий Ю.Э. Повышение эксплуатационной надежности низконапорных гидротехнических объектов с грунтовыми плотинами // Приволжский научный журнал. 2012. № 2. С. 35–40.

8. Бальзанников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119–124.

9. Дормидонтова Т.В., Кирьяков В.В. Применение методов теории надёжности на практике // Научное издание. 2015. Т. 7, № 2.

10. Dormidontova T.V. Operational safety assessment of stadium stands // Procedia Engineering XXIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) (TFoCE 2015).

11. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Издательский дом «Агни», 2010. Кн. I. 360 с.

12. Романов А.А. Куйбышевский гидроузел. История и жизнь. Самара: Арт-Лайт, 2018. 272 с.

2. Balzannikov M.I., Ivanov B.G., Mikhasek A.A. Hydraulic structures condition management system. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2012, no. 7, pp. 119–124. (in Russian)

3. Leonov O.V., Romanov A.A., Evdokimov S.V. Analysis of seismic conditions of the Zhigulevskaya HPP location area. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2011, no. 2, pp. 109–114. (in Russian)

4. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Assessment of reliability of hydraulic structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2012, no. 1, pp. 49–53. (in Russian)

5. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Criteria for assessing the reliability and technical condition of hydraulic structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2011, no. 2, pp. 105–109. (in Russian)

6. Balzannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive examination of the technical condition of building structures of the Zhigulevskaya HPP structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Planning and Architecture], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)

7. Balzannikov M.I., Rodionov M.V., Senitsky Yu.E. Improvement of operational reliability of low-pressure hydraulic facilities with soil dams. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal* [Volga Scientific Journal], 2012, no. 2, pp. 35–40. (in Russian)

8. Balzannikov M.I., Ivanov B.G., Mikhasek A.A. Hydraulic structures condition management system. *Vestnik MGSU* [MGSU Bulletin], 2012, no. 7, pp. 119–124. (in Russian)

9. Dormidontova T.V., Kiryakov V.V. Application of reliability theory methods in practice. *Naukovedenie* [Science of Science], 2015, vol. 7, no. 2. (in Russian)

10. Dormidontova T.V. Operational safety assessment of stadium stands. *Procedia Engineering XXIV R-S-P seminar. Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) (TFoCE 2015)*.

11. Romanov A.A. *Zhigulevskaya GJeS. Jekspluatatsiya gidrotehnicheskikh sooruzhenij* [Zhigulevskaya HPP. Operation of hydraulic structures]. Samara, Publishing house «Agni», 2010. I.I. 360 p.

12. Romanov A.A. *Kuibyshevskij gidrouzel. Istorija i zhizn'* [Kuibyshevsky hydroelectric complex. History and life]. Samara, Art and Light, 2018. 272 p.

REFERENCES

1. Balzannikov M.I., Zubkov V.A., Kondratyeva N.V., Khurtin V.A. Comprehensive examination of the technical condition of building structures of the Zhigulevskaya HPP structures. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering Construction], 2013, no. 6, pp. 21–27. (in Russian)

Об авторах:

ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой природоохранного
и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sali5@mail.ru

EVDOKIMOV Sergey V.

PhD of Engineering Sciences, Associate Professor, Head
of the Nature Protection and Hydrotechnical
Construction Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: sali5@mail.ru

ОРЛОВА Алла Алексеевна

старший преподаватель кафедры природоохранного
и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: allaorlova5@mail.ru

ORLOVA Alla Al.

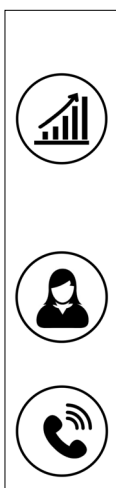
Senior Lecturer of the Nature Protection
and Hydrotechnical Construction Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: allaorlova5@mail.ru

Для цитирования: Евдокимов С.В., Орлова А.А. Анализ сценариев возможного развития аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 1. С. 45–50. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.07.

For citation: Evdokimov S.V., Orlova A.A. Analysis of scenarios of possible development of emergency situation on hydraulic structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 1, pp. 45–50. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.07.



ЦЕНТР «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»



Повышение энергетической эффективности зданий и сооружений и оптимизации работы систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения; исследование теплофизических характеристик строительных и теплоизоляционных материалов; разработка новых инженерных методов теплофизического расчёта строительных ограждающих конструкций; разработка нормативной документации по расчёту и проектированию строительных ограждающих конструкций

Юрий Серафимович ВЫТЧИКОВ

кандидат технических наук

443001, г. Самара, Молодогвардейская, 194
(846) 339-14-76, 339-14-55
git.2008@mail.ru