

УДК 502/504:627.8

А. А. РОМАНОВ

ОАО «Жигулевская ГЭС»

Б. Г. ИВАНОВ, С. В. ЕВДОКИМОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

## ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОСНОВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС

*Рассмотрены гидротехнические сооружения Жигулевской ГЭС – бетонная и земляная плотины. Дана оценка опасности разжижения песчаного грунта в основании плотины. Проведен анализ сейсмостойкости основных гидротехнических сооружений ГЭС. Определены расчетные сейсмические воздействия на основные сооружения.*

*Гидротехнические сооружения, конструкции, грунт основания, сейсмостойкость, расчетные сейсмические воздействия.*

*There are considered the waterworks of the Zhigulevskaya HPP (Hydro Power Plant) – concrete and earth dams. The danger of sandy soil dilution in the dam base is assessed. The analysis was carried out on the earthquake resistance of the HPP main hydraulic structures. Rated seismic impacts on the main structures were determined.*

*Waterworks, structures, grounds of base, earthquake resistance, rated seismic impacts.*

Жигулевская гидроэлектростанция (ранее – Куйбышевская ГЭС имени В. И. Ленина) должна отвечать самым высоким требованиям обеспечения безопасной эксплуатации. Основные гидротехнические сооружения гидроузла: бетонная водосливная плотина, земляная плотина, здание гидроэлектростанции – относятся к подпорным сооружениям I класса. При их проектировании применялись нормативные требования периода строительства. Однако позже нормативная сейсмичность района расположения сооружений по новой карте общего сейсмического районирования России (ОСР-97С) была повышена с 5 до 7 баллов. В связи с этим требовалось определить новые параметры расчетных сейсмических воздействий и выполнить поверочные расчеты сейсмостойкости основных сооружений гидроэлектростанции.

В составе работ при оценке параметров расчетных сейсмических воздействий был выполнен годичный цикл непрерывной регистрации сейсмических событий тремя сейсмостанциями для оценки сейсмической активности района расположения гидроэлектростанции. Анализ расчетных сейсмических воздействий для

проверки сооружений гидроэлектростанции на сейсмостойкость показал, что площадка Жигулевской ГЭС не испытывает значимых сейсмических воздействий ни от землетрясений удаленных сейсмически активных зон, ни от зон возникновения очагов землетрясения на Восточно-Европейской платформе.

Учитывая уровень нормативной сейсмичности по карте ОСР-97С, поверочные расчеты сооружений гидроэлектростанции на сейсмостойкость были выполнены для уровня сейсмичности 7 баллов. Для задания расчетных сейсмических воздействий семибалльного уровня в качестве расчетного принято максимальное возможное землетрясение для рассматриваемого региона Восточно-Европейской платформы, которое оценивается магнитудой  $M = 5,5$ , с глубиной  $H = 15 \pm 5$  км и интенсивностью в эпицентре до  $I_0 = 7$  баллов [1, 2]. В качестве аналога принято землетрясение, происшедшее на Среднем Урале 17 августа 1914 года, в предположении, что подобное землетрясение произойдет непосредственно под сооружениями Жигулевской ГЭС.

Задание расчетных сейсмических воздействий семибалльного уровня

выполнено с учетом грунтов, залегающих в основании основных сооружений гидроузла. Участки размещения земляной, водосливной бетонной плотин, гидроэлектростанции характеризуются неоднородным основанием [3]. Земляная плотина располагается на четвертичных песках или галечниках мощностью от 7,5 до 20 м. Основанием водосливной бетонной плотины является слой современных четвертичных отложений: песков мощностью до 2,5 м или галечников мощностью до 10 м. Ниже залегают мелкозернистые средне- и древнечетвертичные пески с прослоями глин общей мощностью 50...60 м [4]. В основании здания гидроэлектростанции залегают кинельские глины мощностью до 115 м или суглинки мощностью до 15 м, подошвой которых являются разновозрастные глины.

На левом берегу реки Волги расположены два двухниточных судоходных шлюза. Камеры шлюзов находятся на слое четвертичных песков мощностью до 14 м, в подошве которых залегают галечники мощностью до 2 м. Ниже залегают средне-, древнечетвертичные пески мощностью до 50 м.

Изменение грунтовых условий приводит к вариации параметров колебаний на отдельных участках Жигулевской ГЭС [5]. Амплитуда горизонтальных ускорений варьируется от 0,15 до 0,23°. Параметры сейсмических колебаний грунта (максимальные амплитуды ускорений  $A_{\text{П}}$ , преобладающие периоды максимальных колебаний  $T$ , продолжительность  $x$ ) получены для непригруженной поверхности и вероятности превышения  $p = 0,5$ .

Параметры сейсмических воздействий определены с учетом влияния особенностей геологического строения,

имеющихся данных о свойствах среды на пути сейсмических волн от очага до основания размещения основных сооружений в районе размещения гидроэлектростанции. Расчетные сейсмические воздействия определены для наихудшего варианта расположения расчетного очага землетрясения сбросового типа на глубине 15 км, непосредственно под площадкой гидроэлектростанции.

При выполнении расчетов использовались параметры наиболее вероятных сейсмических колебаний грунтов уровня максимального расчетного землетрясения, находящихся в основании сооружений. По установленным параметрам наиболее вероятных сейсмических колебаний на площадке гидроэлектростанции была построена обобщенная модель расчетного сейсмического воздействия.

Оценка опасности разжижения песчаного грунта в основании плотины Жигулевской ГЭС основана на экспериментальных данных, полученных в Японии, Китае, США и Центральной Америке, и соответствующих корреляционных зависимостях, связывающих магнитуды землетрясений  $M_s$  и критические расстояния  $R_{\text{кр}}$  от эпицентра, на которых наблюдались явления разжижения грунтов. При воздействиях от заданного землетрясения уровня максимального расчетного землетрясения ( $M = 5,5$ ;  $R = 15$  км) по имеющимся соотношениям получены следующие значения критических расстояний  $R_{\text{кр}} = 2,4...4,3$  км, ниже которых наблюдаются эффекты разжижения грунта, и порогового уровня величины сейсмического потенциала разжижения  $Q_{\text{крит}}$ , при превышении которого наступает разжижение грунта (таблица).

**Оценка опасности разжижения грунта на участках размещения сооружений Жигулевской ГЭС**

Зона возникновения очагов землетресения	Магнитуда $M$	Гипоцентральное расстояние, $R$ , км	Критическое расстояние $R_{\text{кр}}$ , км			Пороговый уровень сейсмического потенциала разжижения $Q_{\text{крит}}$	Фактическое расстояние $Q_{\text{факт}}$		
			Япония	Китай	Запад США				
Местная	5,5	15	4	2	3	1314	404	286	571

Из таблицы следует следующий вывод: фактические расстояния до расчетного очага землетрясения превышают критические расстояния, на которых возникает эффект разжижения, а значения

сейсмического потенциала, соответствующего максимальному расчетному землетрясению (МРЗ), ниже критического значения, при превышении которого возможно разжижение грунта. Соответственно на

участке земляной плотины Жигулевской ГЭС не ожидается разжижения грунта при заданном расчетном землетрясении максимального уровня.

Оценка сейсмостойкости основных сооружений Жигулевской ГЭС выполнена ОАО «НИИЭС». Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния проведены для пойменной и русловой земляных плотин, а также здания ГЭС и водосливной плотины Жигулевской ГЭС на статические и сейсмические нагрузки. Расчеты сделаны методом конечных элементов. Расчет земляной плотины выполнен в плоской постановке. При расчете здания ГЭС и водосливной плотины решалась трехмерная задача. Расчетные характеристики грунтов основания и тела плотин принимались по аналогам. В ОАО «НИИЭС» имеется архив результатов трехосных испытаний грунтов различных типов при различных плотностях укладки. Из этого архива были выбраны «паспорта» трехосных испытаний грунтов, наиболее близких по плотности укладки и прочности к реальным.

При расчете бетонных сооружений, с учетом большого срока их эксплуатации, использованы приведенные модули упругости материала, которые меньше нормативных. Напряженное состояние, полученное в процессе расчета земляных плотин на статические нагрузки, принималось за начальное при расчете на сейсмические нагрузки. Расчетные сейсмические воздействия определены на основе микросейсмораионирования зон расположения сооружений Жигулевской ГЭС.

Расчетные исследования земляных плотин выполнены для горизонтальной составляющей расчетной акселерограммы землетрясения E-35-Г1 М9, задаваемой по контакту плотины с основанием. Здание гидроэлектростанции рассчитано на трехкомпонентный спектр действия акселерограммы E-35-Г1 М1 по линейной спектральной теории. В качестве спектров действия при расчетах водосливной плотины принимались три компонента воздействия: E-35-Г1, Г2 и В (модель среды – М8).

При расчете земляных плотин учитывалась поэтапность возведения сооружений, причем первый этап моделировал формирование напряженно-деформированного состояния в основании плотин.

Результаты расчетов пойменной и русловой частей плотины на статические нагрузки свидетельствуют о формировании благоприятного напряженно-деформированного их состояния, характерного для однородных плотин.

Результаты расчетов земляной плотины на сейсмические нагрузки также не выявили каких-либо аномальных отклонений от нормальных условий их эксплуатации. После прохождения сейсмического воздействия напряженно-деформированное состояние плотин практически совпало с их состоянием при действии статических нагрузок. В результате воздействия возникли остаточные горизонтальные перемещения, направленные в сторону верхнего бьефа, но они настолько малы, что на практике ими можно пренебречь.

Изменение перемещений и скоростей во время сейсмического воздействия в контрольных точках позволило определить период (частоту) собственных колебаний земляных сооружений:

$T = 1,2$  с ( $f = 0,83$  Гц) – для пойменной плотины;

$T = 1,8$  с ( $f = 0,56$  Гц) – для русловой плотины.

В результате анализа приведенных результатов расчетных исследований пойменной и русловой частей земляной плотины можно сделать заключение о том, что сейсмическое воздействие практически не влияет на состояние этого сооружения. Такой тезис подтвержден существующими расчетами (Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС имени В. И. Ленина. – 1950–1958 годы). Кроме того, затухающий характер перемещений в контрольных точках во время сейсмического воздействия свидетельствует об устойчивости низового откоса земляной плотины.

Результаты анализа воздействий на здание гидроэлектростанции свидетельствуют о том, что хотя ни в одной зоне здания напряжения не превышают пределов прочности бетона, в самом неблагоприятном состоянии находится машинный зал станции (стены и покрытие). Расчеты здания гидроэлектростанции на сейсмические воздействия выполнялись по линейной спектральной теории с учетом 30 форм собственных колебаний. Возникающие напряжения в конструкциях здания при действии сейсмических нагрузок

не превышали пределов прочности бетона, за исключением стен машинного зала по осям 2 и 4. Поскольку суммарные напряжения в конструкциях здания гидроэлектростанции определяются суммированием статических и динамических напряжений, из полученных результатов следует, что трещиностойкость стен по осям 2 и 4 машинного зала не обеспечивается, что сопровождается образованием трещин и передачей усилий на арматуру [6–8]. Для стен по осям 2 и 4 машинного зала расчеты выполнены с учетом прочности. Прочность оценивалась сопоставлением фактической площади установленной арматуры с расчетной.

Результаты расчетов показали следующее:

в нижней средней части стены (в зоне максимальных растягивающих напряжений) по оси 4 при самом невыгодном сочетании статических и сейсмических нагрузок при расчете по нормальным сечениям дефицит установленной продольной арматуры незначителен – 11 %. Примерно такое же соотношение дефицита возникает и в стене по оси 2. Учитывая повышение сопротивления металла арматуры при скоростном (сейсмическом) нагружении, следует считать, что несущая способность по нормальным сечениям обеспечивается;

по наклонным сечениям стен по рядам 2 и 4 на действие перерезывающих усилий, возникающих в основном от действия горизонтального сейсмического воздействия, прочность сжатой зоны с учетом швов бетонирования является недостаточной без поперечного армирования (поперечная арматура в соответствии с техническим проектом установлена не с точки зрения обеспечения прочности, а с технологической – для связи каркасов). Однако в качестве поперечной арматуры, которая может воспринять поперечные усилия, можно считать монтажные связи армокаркасов, которые обеспечивают прочность стен по рядам 2 и 4 и по наклонным сечениям. Исходя из полученных результатов, следует считать, что прочность стен машинного зала по рядам 2 и 4 по несущей способности, при совместном действии статических и сейсмических нагрузок, обеспечивается. Подводя общий итог результатам выполненных расчетных исследований, можно сделать заключение о том, что сейсмостойкость и прочность конструкций сооружений на-

порного фронта Жигулевской ГЭС при действии статических и сейсмических нагрузок обеспечена.

При расчете водосливной плотины на статические нагрузки учитывались следующие характеристики: давление воды со стороны верхнего бьефа (отметка 68,0 м) с учетом волны (0,2 м) и ветрового нагона (0,2 м); боковое давление грунта анкерного понура; усилие от анкерного понура; взвешивающее давление воды на фундаментную плиту; давление воды со стороны нижнего бьефа (отметка 41,5 м).

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о благоприятном напряженно-деформированном состоянии водосливной плотины, возникающем при действии статических нагрузок.

Расчеты водосливной плотины на сейсмические воздействия выполнялись по линейной спектральной теории с учетом 30 форм собственных колебаний. В результате расчета на сейсмические нагрузки определена инерционная нагрузка. Выполнена оценка устойчивости секции водосливной плотины на сдвиг при одновременном действии статических и сейсмических нагрузок. Коэффициенты запаса устойчивости секции водосливной плотины на сдвиг равны 1,25...1,27, что свидетельствует об устойчивости секции водосливной плотины при одновременном действии статических и сейсмических нагрузок.

#### Выводы

Результаты расчетов пойменной и русловой частей плотины на статические нагрузки свидетельствуют о формировании благоприятного напряженно-деформированного их состояния, характерного для однородных плотин. После прохождения сейсмического воздействия напряженно-деформированное состояние земляных плотин практически совпало с их состоянием при действии статических нагрузок. Кроме этого, анализ полученных результатов позволил сделать вывод о благоприятном напряженно-деформированном состоянии водосливной плотины, возникающем при действии статических нагрузок.

1. Заключение Государственной экспертизы по декларации безопасности гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС. – М.: – Ростехнадзор, 2005.

2. Определение параметров сейсмиче-

ских воздействий, выполнение поверочных расчетов сейсмостойкости с учетом современного состояния грунтов и конструкций сооружений Жигулевской ГЭС: метод. рекомендации; разработчики ОАО «Инженерный центр ЕЭС-Гидропроект», «Ленгидропроект», «Теплоэнергопроект», фирма «ОРГРЭС». – М.: Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли (ЦСГНЭО), 2004.

3. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев [и др.] – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2009. – 514 с.

4. Леонов О. В., Романов А. А., Евдокимов С. В. Анализ сейсмических условий района расположения Жигулевской ГЭС // Вестник СГАСУ. – 2011. – № 2. – С. 12–22.

5. Романов А. А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. – Самара: изд-во «Агни», 2010. – 360 с.

6. Вибрационное обследование гидроагрегата ст. 1 Жигулевской ГЭС после проведения капитального ремонта. –

Жигулевск: ООО «Ампер», 2009.

7. Заключение эксперта № 026-039-02-00223 от 8 апреля 2010 года – Тольятти: ТПП «СОЭКС-Тольятти», 2010.

8. Заключение Государственной экспертизы по декларации безопасности гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС. – М.: Ростехнадзор, 2011.

Материал поступил в редакцию 08.06.12.

**Романов Алексей Александрович**, кандидат технических наук, профессор, главный эксперт, заслуженный энергетик СССР

Тел. 8 (84862) 7-93-50

**Иванов Борис Георгиевич**, доктор технических наук, доцент кафедры «Технология и организация строительного производства»

Тел. 8 (846) 242-14-93

**Евдокимов Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Природоохранное и гидротехническое строительство»

Тел. 8 (846) 242-21-71

УДК 502/504:628.288:532.527.001.5

**И. С. РУМЯНЦЕВ, И. В. МАРКИНА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОСНОВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС

*Обобщен опыт формирования и использования закрученных потоков в водопропускных сооружениях, подтверждена возможность применения таких потоков для повышения наносотранспортирующей способности потока.*

*Ливневая канализация, закрученный поток, завихритель, тангенциальный, отстойник, наносы, транспортирующая способность потока, осевой поток.*

*There is generalized the experience of formation and usage of twisted flows in water culverts, the possibility of their usage is confirmed for increasing the flow nanotransporting capacity.*

*Storm sewage, twisted flow, swirler, tangential, mud box, drifts, flow transporting capacity, axial flow.*

Перенос естественным или искусственным потоком наносов – явление, широко распространенное как в природе, так и технике, например, в строительстве (гидротранспорт), в гидроэнергетике (промывные галереи отстойников ГЭС), в коммунальном

хозяйстве (отвод ливневых вод с территории города). Однако существует серьезная проблема осаждения наносов на дно трубопроводов, что приводит к их заилению, ухудшению условий работы и, в конечном счете, к необходимости проведения дорогостоящих