

УДК 627.8

А.А. РОМАНОВ

кандидат технических наук, профессор,
главный эксперт ОАО «Жигулевская ГЭС», Заслуженный энергетик СССР
Жигулевская ГЭС

О.В. ЛЕОНОВ

директор филиала ОАО «РусГидро», «Жигулевская ГЭС»
Жигулевская ГЭС

С.В. ЕВДОКИМОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры природоохранного и гидротехнического строительства
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС

SEISMIC STABILITY OF THE BASIS GROUNDS AND CONSTRUCTIONS OF BASIC STRUCTURES
OF THE ZHIGULEVSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION

Оценена опасность разжижения песчаного грунта в основании плотины Жигулевской ГЭС и проанализирована сейсмостойкость ее основных сооружений. Определены и заданы расчетные сейсмические воздействия для проверки основных сооружений ГЭС на сейсмостойкость.

Ключевые слова: Жигулевская ГЭС, расчетные сейсмические воздействия, оценка опасности разжижения грунта, оценка сейсмостойкости.

С целью определения параметров расчетных сейсмических воздействий и выполнения поверочных расчетов сейсмостойкости сооружений Жигулевской ГЭС, относящейся к подпорным сооружениям I класса, в связи с повышением нормативной сейсмичности района их расположения по новой карте общего сейсмического районирования России (ОСР-97) с 5 до 7 баллов, была проведена работа, результаты которой представлены ниже.

Оценка параметров расчетных сейсмических воздействий и поверочные расчеты сейсмостойкости сооружений выполнялись на основе уточнения исходной сейсмичности района расположения ГЭС и сейсмического микрорайонирования площадки.

В составе работ был выполнен годичный цикл непрерывной регистрации сейсмических событий тремя сейсмостанциями для оценки сейсмической активности района расположения ГЭС.

Here is estimated the dilution danger of a sandy ground in the basis of a dam of the Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station and the seismic stability of basic constructions of the Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station is analysed. The calculated seismic influence for checking the seismic stability of basic structures of the Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station is defined and set.

Keywords: the Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station, calculated seismic influence, an estimation of the ground dilution danger, a seismic stability estimation.

Анализ расчетных сейсмических воздействий для проверки сооружений ГЭС на сейсмостойкость показал, что площадка Жигулевской ГЭС не испытывает значимых сейсмических воздействий как от землетрясений удаленных сейсмически активных зон, так и от зон ВОЗ Восточно-Европейской платформы.

Учитывая уровень нормативной сейсмичности по карте ОСР-97С, поверочные расчеты сооружений ГЭС на сейсмостойкость были выполнены для уровня сейсмичности 7 баллов. Для задания расчетных сейсмических воздействий 7-балльного уровня, в качестве расчетного принято максимальное возможное землетрясение (МВЗ) 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. В качестве аналога было принято землетрясение, происшедшее на Среднем Урале

17 августа 1914 г., в предположении, что подобное землетрясение произойдет непосредственно под участком Жигулевской ГЭС.

Задание расчетных сейсмических воздействий 7-балльного уровня выполнено с учетом грунтов, залегающих в основании основных сооружений гидроузла, в состав которых входят: гидроэлектростанция совмещенного типа длиной 700 м, водосбросная бетонная и земляная плотины, шлюзы.

Участки размещения земляной, водосбросной бетонной плотин, гидроэлектростанции характеризуются неоднородным основанием.

Земляная плотина располагается на четвертичных песках или галечниках мощностью от 7,5 до 20 м.

Основанием водосбросной бетонной плотины является слой современных четвертичных отложений: песков мощностью до 2,5 м или галечников мощностью до 10 м. Ниже залегают мелкозернистые средне-, древнечетвертичные пески с прослоями глин общей мощностью 50-60 м.

В основании гидроэлектростанции залегают кинельские глины мощностью до 115 м или суглинки мощностью до 15 м, подошвой которых являются разновозрастные глины.

На левом берегу р. Волги расположены два двухниточных шлюза. Камеры устроены 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 Жигулёвской ГЭС. Амплитуда горизонтальных ускорений варьируется от 0,15 до 0,23 g. Параметры сейсмических колебаний грунта (максимальные амплитуды ускорений A , преобладающие периоды максимальных колебаний T , продолжительность χ)

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 ГЭС.

Расчетные сейсмические воздействия определены для наихудшего варианта расположения расчетного очага землетрясения сбросового типа с $M_{MP3} = 5,5$ на глубине 15 км непосредственно под площадкой ГЭС.

При выполнении расчетов использовались параметры наиболее вероятных сейсмических колебаний грунтов уровня МРЗ, находящихся в основании сооружений.

По установленным параметрам наиболее вероятных сейсмических колебаний на площадке ГЭС была построена обобщенная модель расчетного сейсмического воздействия.

Оценка опасности разжижения песчаного грунта в основании плотины Жигулёвской 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 $R_{кр}$ от эпицентра, на которых наблюдались явления разжижения грунтов.

При воздействиях от заданного землетрясения уровня МРЗ ($M = 5,5$; $R = 15$ км) по имеющимся соотношениям получены следующие значения критических расстояний $R_{кр} = 2,4-4,3$ км, ниже которых наблюдаются эффекты разжижения грунта, и порогового уровня величины сейсмического потенциала разжижения $Q_{крит}$, при превышении которого наступает разжижение грунта (табл. 1).

Таблица 1

Оценка опасности разжижения грунта на участках размещения Жигулёвской ГЭС

Зона ВОЗ	Магнитуда M	Гипоцентральное расстояние R , км	Критическое расстояние $R_{кр}$, км			Пороговое критическое $Q_{крит}$	Фактическое $Q_{факт}$		
			Япония	Китай	Зап. США		404	286	571
Местная	5,5	15	4	2	3	1314	404	286	571

Как следует из таблицы, в нашем случае фактические расстояния до расчетного очага землетрясения превышают критические расстояния, на которых возникает эффект разжижения, а значения

сейсмического потенциала, соответствующего 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 уровня МРЗ.

Оценка сейсмостойкости основных сооружений Жигулевской ГЭС выполнена ОАО «НИИЭС». Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнены для пойменной и русловой земляных плотин, а также здания ГЭС и водосливной плотины Жигулевской ГЭС на статические и сейсмические нагрузки.

Расчеты выполнены методом конечных элементов. Расчет земляных плотин 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, учитывая большой срок их эксплуатации, использованы приведенные модули упругости материала, которые меньше нормативных.

Напряженное состояние, полученное при расчете земляных плотин на статические нагрузки, принималось за начальное при расчете на сейсмические нагрузки.

Расчетные сейсмические воздействия определены на основе микросейсмрайонирования зон расположения сооружений Жигулевской ГЭС.

Расчетные исследования земляных плотин выполнены на горизонтальную составляющую расчетной акселерограммы землетрясения Е-35-Г1 М9, задаваемую по контакту плотины с основанием.

Здание ГЭС рассчитывалось на трехкомпонентный спектр действия акселерограммы Е-35-Г1 М1 по линейной спектральной теории.

В качестве спектров действия при расчетах водосливной плотины принимались три компоненты воздействия Е-35-Г1, Г2 и В (модель среды - М8).

При расчете земляных плотин учитывалась поэтапность возведения сооружений, причем первый этап моделировал формирование НДС в основании плотин.

Результаты расчетов пойменной и русловой плотин на статические нагрузки свидетельствуют о формировании благоприятного их напряженно-

деформированного состояния, характерного для однородных плотин.

Результаты расчетов земляных плотин на сейсмические нагрузки также не выявили каких-либо аномальных отклонений от нормальных условий их эксплуатации. После прохождения сейсмического воздействия НДС плотин практически совпало с их состоянием при действии статических нагрузок. В результате воздействия возникают остаточные горизонтальные перемещения, направленные в сторону верхнего бьефа, но они настолько малы, что практически 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 земляных плотин можно сделать заключение о том, что сейсмическое воздействие практически не влияет на состояние этих сооружений.

Кроме того, затухающий характер перемещений в контрольных точках во время сейсмического воздействия говорит об устойчивости низового откоса земляных плотин.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, хотя ни в одной зоне здания ГЭС напряжения не превышают пределов прочности бетона, в самом неблагоприятном состоянии находится машинный зал станции (стены и покрытие).

Расчеты здания ГЭС на сейсмические воздействия выполнялись по линейной спектральной теории с учетом 30 форм собственных колебаний.

Возникающие напряжения в конструкциях здания ГЭС при действии сейсмических нагрузок не превышают пределов прочности бетона, за исключением стен машинного зала по осям 2 и 4.

Учитывая, что суммарные напряжения в конструкциях здания ГЭС определяются суммированием статических и динамических напряжений, то из полученных результатов следует, что трещиностойкость стен по осям 2 и 4 машинного зала не обеспечивается, что сопровождается образованием трещин и передачи усилий на арматуру.

Для стен по осям 2 и 4 машинного зала были выполнены расчеты по оценке их прочности. Проч-

ность оценивалась сопоставлением фактической площади установленной арматуры с расчетной.

Результаты расчетов показали следующее [1-4]:

- 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 (Q_x , Q_y), 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 расчётных исследований, можно сделать заключение о том, что сейсмостойкость и прочность конструкций сооружений напорного фронта Жигулёвской ГЭС при действии статических и сейсмических нагрузок обеспечена.

При расчете водосливной плотины на статические нагрузки учитывались следующие факторы: давление воды со стороны верхнего бьефа (отм. 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 давле-

ние воды на фундаментную плиту; давление воды со стороны нижнего бьефа (отм. 41,5 м).

Анализ полученных результатов позволяет 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 $k_{зап} = 1,25 - 1,27$, что свидетельствует об устойчивости секции водосливной плотины при одновременном действии статических и сейсмических нагрузок.

При оценке сейсмостойкости гидротехнических сооружений изучались вопросы сейсмостойкости гидросилового, механического оборудования, расположенности здания ГЭС, механического оборудования на водосливной плотине и электротехнического оборудования открытых распределительных устройств 500, 220 и 110 кВ.

Сейсмостойкость основного механического и энергетического оборудования Жигулёвской ГЭС при расчетном сейсмическом воздействии, определенном в соответствии с новой картой сейсмического районирования, в целом обеспечена и не вызывает сомнения.

Все электротехническое оборудование, расположенное на верхнем ярусе здания ГЭС, целесообразно обезопасить, предусмотрев его автоматическое отключение при возникновении сейсмических колебаний с интенсивностью более 6 баллов по шкале МСК.

После окончания землетрясения необходимо будет провести комиссионную проверку всего оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заключение Государственной экспертизы по декларации безопасности гидротехнических сооружений Жигулёвской ГЭС [Текст] / Ростехнадзор. – М., 2005.
2. Определение параметров сейсмических воздействий, выполнение поверочных расчетов сейсмо-

стойкости с учетом современного состояния грунтов и конструкций сооружений Жигулевской ГЭС [Текст] / ОАО «Инженерный центр ЕЭС-Гидропроект, Ленгидропроект, Теплоэнергопроект, Фирма ОРГРЭС» Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли (ЦСГНЭО). – М., 2004.

3. Романов, А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Книга I [Текст] / А.А. Романов. – Самара: Агни, 2010. – 360 с.

4. Технический отчет о проектировании и строительстве Волжской ГЭС им. В.И. Ленина: в 2 т. 1950-1958 гг.

© Романов А.А., Леонов О.В.,
Евдокимов С.В., 2011