

УДК 502/504:627.8

С. Е. ЛИСИЧКИН

Закрытое акционерное общество
«Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике», Москва

О. Д. РУБИН

Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», Москва

И. Ж. АТАБИЕВ, Н. И. МЕЛЬНИКОВА

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

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ ПОДПОРНЫХ СТЕН ПЕРВОГО ЯРУСА ВОДОПРИЕМНИКА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС

Приведены результаты расчетных исследований устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС в условиях неудовлетворительного состояния дренажной системы.

Подпорные стены, устойчивость, прочность, напряжение, армирование, расчетные случаи.

Подпорные стенки первого яруса, осуществляющие сопряжение водоприемника Загорской ГАЭС с правобережной и левобережной дамбами верхнего аккумулирующего бассейна (ВАБ), представляют собой уникальные железобетонные сооружения, не имеющие аналогов в практике гидротехнического строительства (рис. 1).

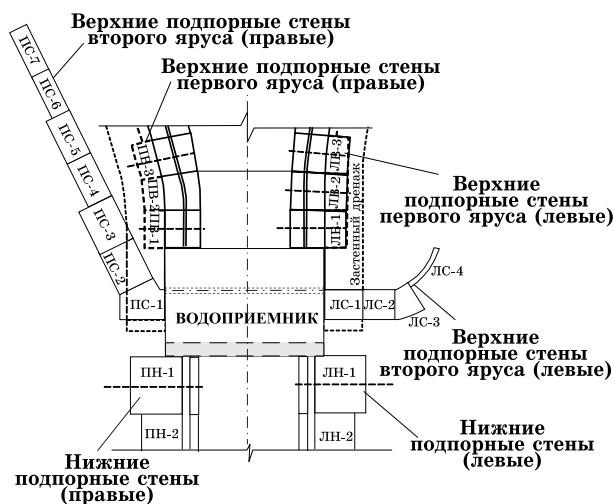


Рис. 1. Схема размещения верхних (первого и второго ярусов) и нижних подпорных стен водоприемника Загорской ГАЭС

Необходимость восстановления упавших стенок и усиления остальных стенок первого яруса обусловлена в основном обрушением левых подпорных стенок ЛВ-1 и ЛВ-2 первого яруса и грунта обратной засыпки во время их строительства (1986).

Подпорные стенки ЛВ-1 и ЛВ-2 восстановлены с одновременным их усилением со стороны лицевой грани и тыловой грани консоли (рис. 2); стенка ЛВ-3 значительно усилена с тыловой грани массивным железобетоном с помощью арматурных анкеров. Усиление же подпорных стенок ПВ-1 ... ПВ-3 выполнено путем утолщения вертикальной консоли со стороны лицевой грани с дополнительным ее армированием и установкой арматурных анкеров, забуриваемых в бетон существующей стенки. Таким образом, стенки первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС представляют собой сложные конструкции (из бетонов различных марок), ослабленные строительными швами различного направления (включая контакты

«нового» бетона со «старым»), имеющие смешанные схемы армирования из арматуры различных классов и диаметров.

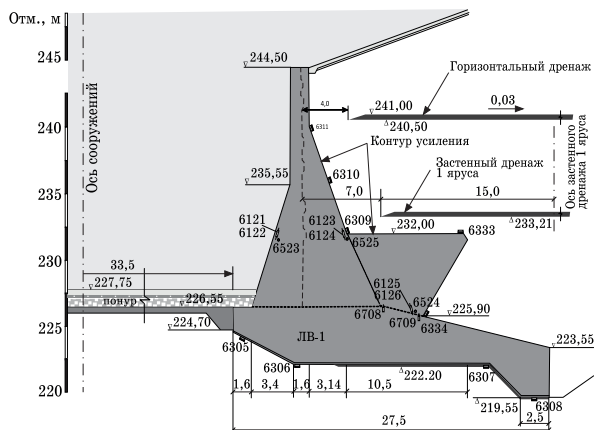


Рис. 2. Конструкция подпорной стены ЛВ-1 первого яруса водоприемника с размещением контрольно-измерительной аппаратуры (КИА): ◻ ПДС; • ПТС; — ПЛПС

Натурными наблюдениями установлен чрезвычайно сложный характер действия нагрузок. Так, начиная с 1988 года за стенками первого яруса и в их основании в верхнем бьефе водоприемника фиксируются избыточные давления, значительно превышающие проектные значения, что свидетельствует о неудовлетворительном состоянии расположенного за стенами (в двух уровнях слоев) горизонтального дренажа [1, 2]. По этой причине существуют опасения в обеспечении достаточного уровня устойчивости и прочности подпорных стенок первого яруса при опорожнении верхнего аккумулярующего бассейна ниже отметки УМО.

В процессе анализа напряженно-деформированного состояния сопрягающих подпорных стенок первого яруса, полученного на основе данных натурных наблюдений в эксплуатационный период, в первую очередь следует отметить следующие нагрузки и воздействия:

давление грунта обратной засыпки и грунтовой воды на тыловые грани стенок;

давление на лицевые грани стенок воды изнутри верхнего аккумулярующего бассейна, изменяющееся в соответствии с режимом работы ГАЭС;

циклические сезонные температурные воздействия внешней среды.

Изменения напряжений в арматуре подпорных стенок в период эксплуатации

зависят от сезона нагрузок и имеют циклический характер.

Максимальные значения растягивающих напряжений в арматуре подпорных стенок первого яруса по показаниям приборов ПСАС (преобразователь силы арматурный струнный) за весь период наблюдений (1989–2010) не превышали расчетного сопротивления, равного 292 МПа, и в последние годы эксплуатации не превышали следующих значений:

53,2 МПа, согласно показаниям ПСАС 6118, установленного на отметке 236,00 м тыловой грани стены ЛВ-1 по середине ее высоты (см. рис. 2);

51,40 МПа, согласно показаниям ПСАС 6121, установленного на отметке 232,00 м лицевой грани стены ЛВ-1 на 1/3 ее высоты (см. рис. 1).

Максимальные значения сжимающих напряжений также не превышали расчетного сопротивления арматуры сжатую и в последние годы достигали:

82,40 МПа, по показаниям ПСАС 6105, установленного в горизонтальном строительном шве между фундаментной плитой и стеной ЛВ-1, в зоне вертикального строительного шва между конструкцией стенки, выполненной по проекту, и блоком ее усиления. Сжимающие напряжения 22...36 МПа зафиксированы также по показаниям ПСАС 6109 и 6110, установленных выше на отметке 233,00 м в зоне того же шва (см. рис. 2).

По показаниям приборов ПСАС, установленных на лицевой грани стенки ЛВ-1 со стороны верхнего аккумулярующего бассейна, с 1990 года наблюдается постепенное увеличение напряжений в арматуре. При этом средний рост максимальных растягивающих напряжений, по показаниям ПСАС 6121 и 6122, составил около 39 МПа.

Температурный режим подпорных стенок ЛВ и ЛВ за длительный период наблюдений отражает сезонное изменение температуры воды и имеет циклический характер в соответствии с годовой гармоникой с наибольшей амплитудой колебаний от зимы к лету с лицевой стороны до 20,7 °С (преобразователь температуры струнный (ПТС) 6523 в ЛВ-1).

В расчетных исследованиях, проводимых ранее, рассматривались характерные случаи:

случай нормальной эксплуатации при максимальном (266,5 м) и минимальном (257,5 м) уровне воды в верхнем аккумулярующем бассейне;

ремонтный случай, при котором отметка уровня воды соответствует отметке верха подпорных стенок 245,5 м (ниже отметки УМО);

случай аварийной сработки верхнего аккумулярующего бассейна до отметки 230,0 м.

Последний из представленных случаев является наиболее неблагоприятным с точки зрения обеспечения устойчивости и прочности подпорных стенок.

При обосновании проектных решений по восстановлению и усилению подпорных стен первого яруса Загорской ГАЭС был рассмотрен строительный случай. Позднее были рассмотрены другие расчетные случаи, при этом результаты расчетов устойчивости (в том числе с учетом упора в понур) вызывали серьезные опасения в случае аварийной сработки верхнего аккумулярующего бассейна.

Настоящие расчеты устойчивости и прочности секций стенок ЛВ-1, ЛВ-2, ЛВ-3, ПВ-1 и ПВ-3 проводили на аварийный и два варианта ремонтных случаев.

Расчетная схема (включая схему действия нагрузок) подпорной стены первого яруса водоприемника (на примере ЛВ-1) представлена на рис. 3.

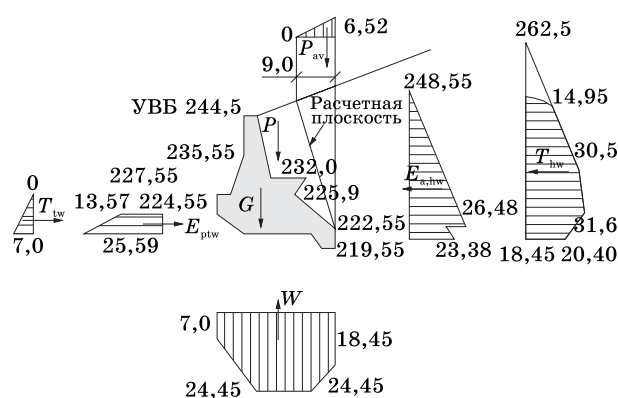


Рис. 3. Расчетная схема подпорной стенки ЛВ-1 первого яруса водоприемника для аварийного расчетного случая

Аварийный расчетный случай включает в себя следующие нагрузки: собственный вес сооружения G ; вес грунта засыпки P ; взвешивающее давление

$W_{взв}$; вес грунта под основанием стенки; гидравлическую нагрузку со стороны тыловой грани стенки T_{hw} ; гидравлическую нагрузку со стороны верхнего бассейна T_{tw} ; активное давление грунта со стороны засыпки $E_{a,hw}$; пассивное давление грунта со стороны камеры $E_{p,tw}$.

Ремонтный расчетный случай (вариант 1) включает в себя следующие нагрузки: собственный вес сооружения; вес грунта засыпки; вертикальную пригрузку водой со стороны верхнего бассейна; взвешивающее противодействие на подошву стенки; вес грунта под основанием стенки; гидравлическую нагрузку со стороны тыловой грани стенки; гидравлическую нагрузку со стороны верхнего бассейна; активное давление грунта со стороны засыпки; пассивное давление грунта со стороны камеры.

Ремонтный расчетный случай (вариант 2) включает в себя следующие нагрузки: собственный вес сооружения; вес грунта засыпки; вертикальную пригрузку водой со стороны верхнего бассейна; взвешивающее противодействие на подошву стенки; вес грунта под основанием стенки; гидравлическую нагрузку со стороны тыловой грани стенки; гидравлическую нагрузку со стороны верхнего бассейна; активное давление грунта со стороны засыпки; пассивное давление грунта со стороны камеры.

В результате предварительных расчетов устойчивости (упомянутых выше) при аварийной сработке верхнего аккумулярующего бассейна устойчивость стенок ЛВ-1, ЛВ-2, ЛВ-3, ПВ-1, ПВ-3, даже с учетом предельного сопротивления понура осевому сжатию, не обеспечивалась.

Согласно СНиП 2.02.02–85* «Основания гидротехнических сооружений», критерием обеспечения устойчивости сооружения системы «сооружение – основание» по горизонтальной поверхности скольжения на уровне подошвы тылового зуба является следующее условие [3]:

$$\gamma_{ic} F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R,$$

где F , R – расчетные значения соответственно обобщенных сдвигающих сил и сил предельного сопротивления или моментов сил, стремящихся повернуть (опрокинуть) и удержать сооружение.

Класс капитальности подпорных стен водоприемника Загорской ГАЭС соответствует второму классу.

Данное выражение можно преобразовать:

$$K = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_{lc} \gamma_n}{\gamma_c} \geq \frac{0,95 \cdot 1,2}{1,0} \geq 1,14 - \text{для основного}$$

сочетания нагрузок периода ремонта;

$$K = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_{lc} \gamma_n}{\gamma_c} \geq \frac{0,9 \cdot 1,2}{1,0} \geq 1,08 - \text{для особого}$$

сочетания нагрузок аварийного периода.

Таким образом, для сооружений второго класса обобщенный коэффициент запаса подпорных стен на сдвиг и опрокидывание должен быть не менее 1,14 для основного сочетания нагрузок и не менее 1,08 для особого сочетания нагрузок.

Результаты расчетов устойчивости подпорных стенок ЛВ-1 и ЛВ-2, ЛВ-3, ПВ-1, ПВ-3 для двух вариантов ремонтных случаев (отметки воды – 244,50 м) представлены в табл. 1.

По результатам выполненных расчетов устойчивости подпорных стен первого

яруса водоприемника можно сделать следующие выводы:

в аварийном случае устойчивость подпорных стен не обеспечивается, в том числе с учетом упора в понур;

в ремонтном случае (вариант 1) устойчивость подпорных стен обеспечивается с учетом упора в понур; при этом понур достигает своего предельного теоретического сопротивления при центральном сжатии;

в ремонтном случае (вариант 2) устойчивость подпорных стен обеспечивается (в большинстве случаев) с учетом упора в понур; при этом понур не достигает своего предельного теоретического сопротивления при центральном сжатии.

Результаты инженерных расчетов прочности подпорных стен ЛВ-1 и ЛВ-2, ЛВ-3, ПВ-1, ПВ-3 для ремонтного расчетного случая (вариант 2) представлены в табл. 2.

По результатам выполненных инженерных расчетов прочности подпорных стен первого яруса можно сделать следующие выводы:

Таблица 1

Результаты расчетов устойчивости подпорных стенок

| Подпорная стенка | Коэффициент запаса устойчивости | |
|------------------|--|--|
| | Основное сочетание нагрузок ремонтного расчетного случая (вариант 1) | Основное сочетание нагрузок ремонтного расчетного случая (вариант 2) |
| ЛВ-1 и ЛВ-2: | без учета упора в понур | 0,54 < 1,14 |
| | с учетом упора в понур | 1,17 > 1,14 |
| ЛВ-3: | без учета упора в понур | 0,56 < 1,14 |
| | с учетом упора в понур | 1,153 > 1,14 |
| ПВ-1: | без учета упора в понур | 1,07 < 1,14 |
| | с учетом упора в понур | 2,34 > 1,14 |
| ПВ-3: | без учета упора в понур | 1,21 > 1,14 |
| | с учетом упора в понур | 2,41 > 1,14 |

в аварийном случае прочность подпорных стен не обеспечивается при чрезмерно высоких напряжениях в растянутой арматуре тыловой грани;

в ремонтном случае (вариант 1) прочность подпорных стен также не обеспечи-

вается, но при значительно более низких напряжениях в тыловой арматуре;

в ремонтном случае (вариант 2), результаты расчетов для которого приведены выше, прочность подпорных стен обеспечивается для всех стенок.

Результаты расчетов прочности подпорных стен

| Подпорная стенка | Напряжение, МПа | |
|------------------------|---------------------|-------------------|
| | В арматуре σ | В бетоне σ |
| ЛВ-1 и ЛВ-2 | | |
| Сечение: | | |
| 1-1 (отметка 232,0 м) | 207,0 | 5,24 |
| 2-2 (отметка 235,55 м) | 163,6 | 4,87 |
| ЛВ-3 | | |
| Сечение: | | |
| 1-1 (отметка 231,8 м) | 121,0 | 2,806 |
| 2-2 (отметка 235,3 м) | 48,74 | 1,63 |
| ПВ-1 | | |
| Сечение: | | |
| 1-1 (отметка 226,55 м) | 188,87 | 5,69 |
| 2-2 (отметка 231,05 м) | 167,47 | 5,35 |
| ПВ-3 | | |
| Сечение: | | |
| 1-1 (отметка 227,59 м) | 169,1 | 5,29 |
| 2-2 (отметка 233,79 м) | 194,47 | 5,355 |

Выводы

Поскольку целью расчетных исследований являлось определение предельных нагрузок (в том числе предельного уровня воды в засыпке), при которых подпорные стенки обладают устойчивостью и прочностью (в том числе с учетом упора лицевых консолей фундаментных плит стенок в понур), было выявлено, что устойчивость подпорных стен в ремонтном случае обеспечивается с учетом упора в понур: для варианта 1 – с учетом предельного теоретически возможного сопротивления бетона понура сжатию; для варианта 2 – при меньших усилиях в понуре (чем предельное сопротивление сжатию), которые получались непосредственно из расчетов численными методами.

Прочность железобетонных конструкций подпорных стенок обеспечивается в ремонтном случае при варианте 2 сочетаний нагрузок с определенным запасом. В большей степени это касается конструкции ЛВ-3, в которой продольной рабочей арматуры установлено больше, чем требовалось по расчету.

1. Загорская ГАЭС на реке Кунье: технический отчет о проектировании, строительстве и первом периоде эксплуатации. – Т. I. Основные сооружения и постоянный поселок. Проектирование. – М.: Институт «Гидропроект», 1999. – С. 214–270.

2. Разработка режима допустимой сработки верхнего бассейна при аварийных ситуациях на основе расчетов на устойчивость и результатов натурных наблюдений стенок первого яруса водоприемника с учетом повреждения дренажных элементов: технический отчет. – М.: ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2003.

3. Основания гидротехнических сооружений: СНиП 2.02.02–85*. – М.: Госстрой, 2004. – 54 с.

Материал поступил в редакцию 12.04.11.

Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, заместитель генерального директора
Тел. 8-926-015-19-59

E-mail: Lisichkin1989@rambler.ru

Рубин Олег Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, зам. генерального директора, технический директор
Тел. 8-903-589-25-90

E-mail: cskte@rambler.ru

Атабиев Исхак Жафарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8-916-147-15-42

E-mail: atabiev-ig@mail.ru

Мельникова Наталья Игоревна, аспирантка
Тел. 8-926-469-22-78

E-mail: melok2504@mail.ru