

## НАТУРНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НИЖНИХ ПОДПОРНЫХ СТЕН ВОДОПРИЕМНИКА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2

Н.И. МЕЛЬНИКОВА, аспирантка

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства», Москва, ул. Прянишникова, д.19, тел. 8(926)469-22-78, e-mail: melok2504@mail.ru*

*Приведены результаты анализа данных натуральных наблюдений нижних подпорных стен водоприемника Загорской ГАЭС-2 в период строительства и результаты расчета напряженно-деформированного состояния нижних подпорных стен численными методами на основе разработанных математических конечно-элементных моделей.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** подпорные стены, напряженно-деформированное состояние, арматура, строительные межблочные швы, вторичные наклонные трещины, напряжение, конечно-элементная модель.

Основным напорным сооружением строящейся Загорской ГАЭС-2 является реверсивный водоприёмник, который решён по схеме руслового здания электростанции, то есть непосредственно воспринимает напор воды верхнего бассейна. Водоприёмный узел, помимо, собственно, водоприемника, включает в себя также подпорные стены, в том числе нижние подпорные стены уголкового типа, которые защищают (ограждают) напорные водоводы.

Нижние подпорные стены водоприемника Загорской ГАЭС-2: ЛН-1...ЛН-5, ПН-1...ПН-5, - представляют собой конструкции уголкового типа и имеют переменную высоту. Максимальная высота у стен ЛН-1 (ПН-1). Подпорная стенка уголкового типа ЛН-1 (ПН-1) имеет фундаментную плиту толщиной 4,4 м, лицевая консоль которой имеет длину 3,0 м, тыловая консоль – 17,2 м. Вертикальная консольная конструкция подпорной стенки переменной высоты имеет максимальную высоту 16,23 м, толщину в корневом сечении 4,8 м.

Железобетонные конструкции подпорных стен ЛН-1 (ПН-1) разделены на отдельные блоки горизонтальными контактными строительными швами.

Горизонтальные строительные швы расположены на отм. 227,87 м (в корневом сечении между фундаментной плитой стенки и блоком I-1); на отм. 231,00 м (между блоками I-1 и I-4); на отм. 235,00 м (между блоками I-4 и I-7); на отм. 238,97 м (между блоками I-7 и I-10).

Конструкция нижних подпорных стен ЛН-1 (ПН-1) представлена на рис.1.

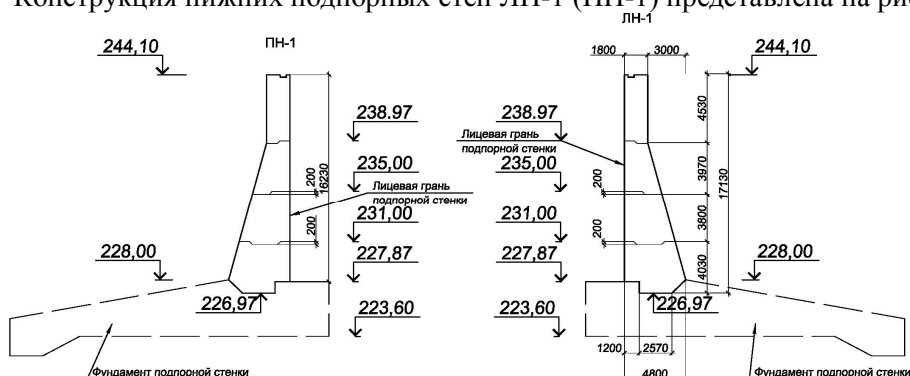


Рис.1. Конструкция нижних подпорных стен ЛН-1 (ПН-1) водоприемника Загорской ГАЭС-2

Натурные наблюдения за подпорными стенами водоприемника Загорской ГАЭС-2 в период строительства, временной и постоянной эксплуатации проводятся с целью:

- получения фактических значений количественных и качественных контролируемых показателей, с помощью которых выполняется оперативная оценка состояния сооружений, и выявляются отклонения в работе сооружений от проектных представлений и нормального эксплуатационного состояния;

- своевременного принятия мер для предотвращения повреждения сооружений и аварийных отказов в работе сооружений;

- своевременного и в оптимальном объеме выполнения ремонтных работ по восстановлению необходимого при эксплуатации уровня безопасности гидросооружений;

- с целью получения научных данных для проверки и уточнения методов расчетов гидротехнических сооружений и конструкций.

Контроль напряженно-деформированного состояния нижних подпорных стен водоприемника осуществляется посредством преобразователей силы арматурных струнных ПСАС-28, ПСАС-40, преобразователей линейных перемещений струнных ПЛПС-3, преобразователей температурных струнных ПТС-60.

Погрешность измерений с помощью струнных преобразователей составляет 0,6...2,0 % при доверительной вероятности 0,9. Снятые показания по дистанционной контрольно-измерительной аппаратуре обрабатываются с помощью градуировочной характеристики, уравнение для построения которой имеет следующий вид:

$$Y = a/x^2 + b/x + c,$$

где  $Y$  - значение измеряемой величины, кПа;  $x$  - значение периода выходного сигнала, мкс. В ходе анализа натурных данных по нижним подпорным стенам ЛН-1 и ПН-1 водоприемника можно отметить следующие особенности их напряженно-деформированного состояния.

Анализ результатов наблюдений за напряжениями в арматуре нижних подпорных стен, пересекающей строительные межблочные швы, показал, что наиболее существенные значения напряжения отмечались в течение 2011 г. И в первом квартале 2012 г.

По показаниям ПСАС-28 №№ 116ПН.3 и 116ПН.4 растягивающие напряжения в вертикальной арматуре правобережной подпорной стенки ПН-1 на отм. 227,87 м в III квартале 2011 г. значительно возросли и в сентябре составили 177,4 МПа (№116ПН.3) и 149,1 МПа (№116ПН.4).

В IV квартале 2011 г. растягивающие напряжения достигли значений 190,6 МПа (№116ПН.3) и 161,2 МПа (№116ПН.4). Далее происходило снижение напряжений, и в I квартале 2012 г. значения достигли 177,7 МПа и 145,4 МПа (6.03.2012 г.).

По показаниям ПЛПС-3 № 17ПН1, установленного в межблочном шве нижней подпорной стенки ПН-1 на отм. 227,87 м во II и III кварталах 2010 г. была зафиксирована ширина раскрытия шва до 0,22 мм.

В IV квартале 2011 г. ширина раскрытия шва увеличилась до 0,36 мм. К концу I квартала 2012 г. ширина раскрытия шва увеличилась до 0,40...0,41 мм.

Графики изменения напряжений в арматуре и ширины раскрытия шва нижней подпорной стены ПН-1 представлены на рис.2. Наблюдения за напряжениями в вертикальной арматуре нижней правобережной подпорной стены ПН-1 на отм. 231,00 м осуществляются по показаниям приборов ПСАС №№ 116ПН5,

116ПН6. В течение III квартала 2011 г. наблюдался некоторый рост растягивающих напряжений до значений 74,9 МПа и 77,8 МПа. В IV квартале 2011 г. происходил рост растягивающих напряжений, и в декабре значения достигли 80,3 МПа (№116ПН5) и 83,5 МПа (№116ПН6). В конце I квартала 2012 г. напряжения существенно не изменились и составили 80,3 МПа и 83,1 МПа.

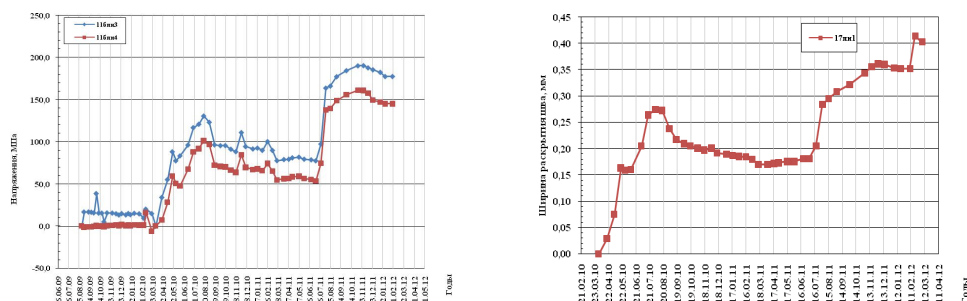


Рис.2. Графики изменения напряжений в вертикальной арматуре (а) и ширины раскрытия шва (б) на отм. 227,87 м в нижней подпорной стене ПН-1 водоприемника Загорской ГАЭС-2

Наблюдения за изменениями ширины раскрытия межблочного шва нижней подпорной стены ПН-1 на отм.231,00м проводятся по показаниям ПЛПС-3 №17ПН2 с апреля 2010 г.

В III квартале 2011 г. ширина раскрытия составила 0,11 мм, в IV квартале 2011 г. ширина раскрытия составила 0,12 мм. В начале февраля 2012 г. произошло скачкообразное увеличение ширины раскрытия шва до 0,37 мм и дальнейший спад до 0,14 мм (6.03.2012 г.).

Графики изменения напряжений в арматуре и ширины раскрытия шва нижней подпорной стены ПН-1 представлены на рис.3.

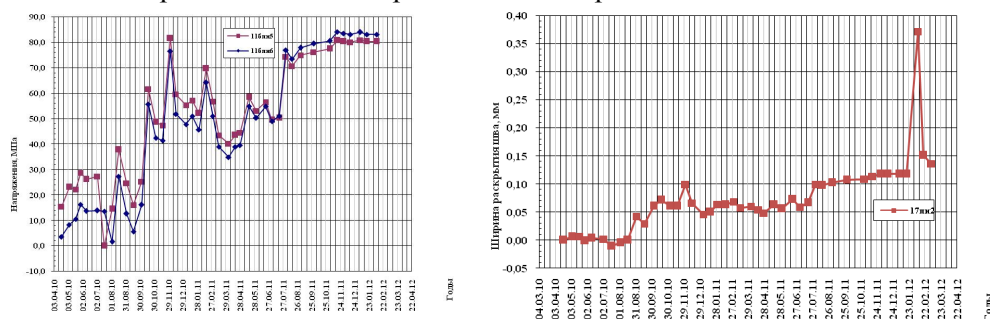


Рис.3. Графики изменения напряжений в вертикальной арматуре (а) и ширины раскрытия шва (б) на отм. 231,00 м в нижней подпорной стене ПН-1 водоприемника Загорской ГАЭС-2

По показаниям ПСАС-28 №№ 116ЛН.3 и 116ЛН.4 напряжения в вертикальной арматуре левобережной подпорной стенки ЛН-1 на отм. 227,87 м к июлю 2011 г. составляли 46,2 МПа (№116ЛН.4) и 51,6 МПа (№116ЛН.3), после чего наблюдался рост напряжений до значений 77,5... 77,7 МПа. К 30.09.2011 г. растягивающие напряжения снизились до 75,1...75,9 МПа. До декабря 2011 г. показания отсутствовали, а на 15.12.2011 г. составили 195,3 МПа (№116ЛН.3) и 194,7 МПа (№116ЛН.4).

В I квартале 2012 г. наблюдался рост растягивающих напряжений и к 6.03.2012 г. значения достигли 220,6 МПа и 219,7 МПа, соответственно.

По показаниям ПЛПС-3 № 17ЛН1, установленного в межблочном шве нижней подпорной стенки ЛН-1 на отм. 227,87 м, с момента бетонирования до 19.04.2011 шов был закрыт.

Затем наблюдалось раскрытие шва шириной до 0,15 мм (19.07.2011 г.). К 30.09.2011 г. ширина раскрытия шва составила 0,21 мм, после чего дальнейшие показания не снимались до декабря 2011 г. К концу IV квартала 2011 г. ширина раскрытия шва возросла до 0,43 мм. В I квартала ширина увеличилась до 0,53 мм.

Графики изменения напряжений в арматуре и ширины раскрытия шва нижней подпорной стены ПН-1 представлены на рис.4.

В ходе проведенных визуальных обследований в нижних подпорных стенах помимо раскрытия межблочных строительных швов отмечается наличие трещин.

В подпорной стене ЛН-1 зафиксирована горизонтальная трещина протяженностью 3 м на высоте 1,7 м с шириной раскрытия 0,15 мм на расстоянии 2 м от верхнего торца (со стороны водоприемника). Раскрытие вертикального межблочного шва составило 0,2 мм.

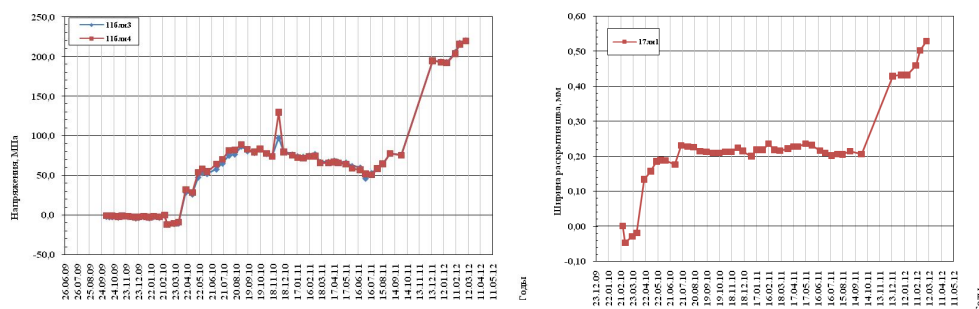


Рис. 4. Графики изменения напряжений в вертикальной арматуре (а) и ширины раскрытия шва (б) на отм. 227,87 м в нижней подпорной стене ЛН-1 водоприемника Загорской ГАЭС-2.

В подпорной стене ПН-1 зафиксировано уменьшение ширины раскрытия трех существующих трещин с 0,25 мм до 0,20 мм на расстоянии 2,80 м от верхнего торца (со стороны водоприемника), с 0,25 мм до 0,20 мм на расстоянии 2,60 м от вертикального межблочного шва и с 0,15 мм до 0,10 мм на расстоянии 1,60 м от вертикального межблочного шва. Также была обнаружена горизонтальная трещина шириной раскрытия 0,05 мм, находящейся на высоте 2 м от подошвы стенки, которая простирается от межблочного шва сопряжения с водоприемником на расстояние 6-7 м.

Следует отметить, что в III квартале 2011 г. в подпорной стене ЛН-1 была зафиксирована горизонтальная трещина протяженностью 3 м на высоте 1,7 м с шириной раскрытия 0,15 мм, обнаруженная на расстоянии 2 м от верхнего торца стены (со стороны водоприемника), которая представляла собой фрагмент выявленной в IV квартале 2011 г. горизонтальной трещины, простирающейся по всей протяженности лицевой грани стены.

В IV квартале 2011 г. в стенах ЛН-1, ЛН-2 и ЛН-3 на их лицевых поверхностях были обнаружены однотипные горизонтальные трещины шириной до 0,15 мм на высоте 1,7...2,1 м от верхней грани фундаментной плиты, которые простираются по всей протяженности лицевой поверхности стен, как бы отделяя верхнюю часть от нижней.

Предположительно, в данном случае обнаружены следы выхода на лицевую грань так называемых вторичных трещин, которые выклиниваются наклонно вниз из раскрывающихся со стороны тыловой грани горизонтальных блочных швов (например, на отм. 231,0 м в стенах ЛН-1 и ЛН-3). При этом посредством горизонтальных трещин, развивающихся по блочным швам на отм. 231,0 м, и далее наклонных вторичных трещин верхние части консолей отделяются от нижних частей стен. Обе части стен контактируют посредством вертикальной (продольной) и горизонтальной (поперечной) растянутой арматуры, а также посредством небольшого участка сжатой зоны бетона в конце наклонной трещины. Анализ трещинообразования в нижних подпорных стенах показал следующее: наличие трещин по строительным швам; вторичных наклонных трещин, выклинившихся из швов по направлению к лицевой грани, указывают на пониженную жесткость железобетонных конструкций и являются следствием совместного действия на нижние подпорные стены водоприемника изгибающих моментов и поперечных сил.

На основании вышеизложенного, для дальнейшего определения напряженно-деформированного состояния и прочности подпорных стен водоприемника были разработаны математические конечно-элементные модели подпорных стен ЛН-1 (ПН-1). При этом в конечно-элементных моделях воспроизводились конструктивные особенности подпорной стены (такие как расположение контактных строительных швов, ослабляющих конструкцию; схемы армирования элементов конструкции и др.); физико-механические характеристики материалов сооружения, грунтов основания и засыпки подпорной стены; и др.

Виды конечно-элементных моделей нижней подпорной стен водоприемника Загорской ГАЭС-2 представлены на рис.5.

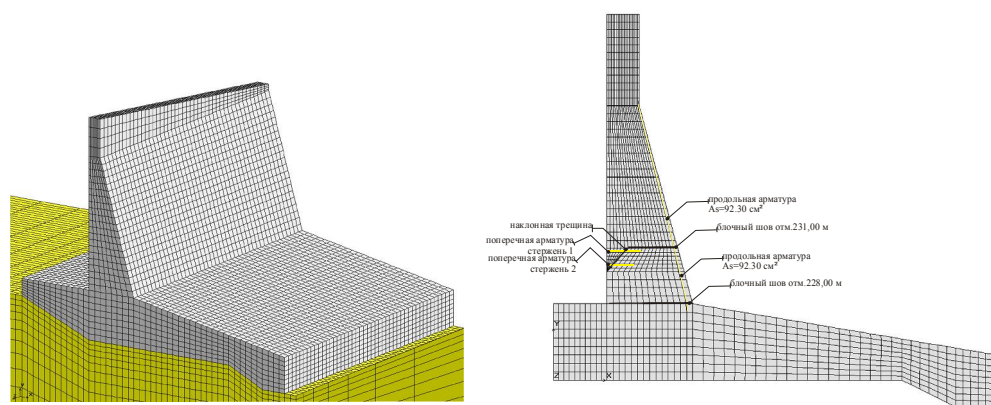


Рис. 5. Виды конечно-элементных моделей нижней подпорной стенки ЛН-1 водоприемника Загорской ГАЭС-2

Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния выполнялись на основе математических конечно-элементных моделей подпорной стены ЛН-1 совместно с основанием для двух расчетных случаев: строительного и эксплуатационного.

На первом этапе исследований выполнялись расчеты в стадии упругой работы железобетона (до образования трещин в бетоне, в том числе по горизонтальным блочным швам). В дальнейших расчетных исследованиях в конечно-элементные модели включались трещины, образующиеся в зонах значительного растяжения, зонах ослабления конструкции блочными швами, зафиксирован-

ных на предыдущем этапе расчетов. Далее выполнялась серия итерационных расчетов напряженно-деформированного состояния в стадии образования и продвижения трещин в бетоне подпорной стены с учетом включившихся в работу арматурных стержней.

Для определения напряжений в арматуре с учетом фактического армирования стены ЛН-1 проведены расчеты НДС на стадии раскрытия блочных швов и образования вторичных трещин. В том числе в конечно-элементных моделях были воспроизведены вторичные крутопадающие трещины, пересекающие поперечную арматуру. При этом было смоделировано размещение поперечной арматуры в зоне прохождения вторичной трещины (под блочным швом), развитие которой происходит из вершины раскрывшегося горизонтального строительного шва на отг. 231,00 м.

Результаты поверочных расчетов по определению напряжений в продольной и поперечной арматуре с учетом фактического армирования представлены ниже в табл. 1. Как это следует из табл. 1, в строительном случае напряжения в поперечной арматуре в зоне вторичной трещины составили 293,1 МПа и превышают расчетное сопротивление поперечной арматуры  $R_{sw}=175$  МПа. Также в эксплуатационном случае напряжения в поперечной арматуре в зоне вторичной трещины составили 296,7 МПа и превышают расчетное сопротивление поперечной арматуры  $R_{sw}=175$  МПа.

Таблица 1

Расчетные случаи	Напряжения в продольной рабочей арматуре у тыловой грани стенки, пересекающей строительные швы на отметках		Напряжения в поперечной арматуре, проходящей ниже шва на отг.231,00 м	
	Шов на отг.227,87 м	Шов на отг.231,00 м	Стержень 1	Стержень 2
Строительный случай	132,9	112,4	293,1	79,6
Эксплуатационный случай	156,1	123,5	296,7	77,3

#### Заключение

Результаты расчетов показали, что в поперечной арматуре стены, пересекающей вторичную наклонную трещину, возникают значительные растягивающие напряжения 293,1 МПа в строительном расчетном случае и 296,7 МПа в эксплуатационном расчетном случае (превышающие расчетное сопротивление 175 МПа). Растягивающие напряжения в продольной арматуре у тыловой грани стены не превышают расчетное сопротивление арматуры (435 МПа) при значительном запасе. Данные результаты свидетельствуют о недостаточном количестве установленной поперечной арматуры и подтверждают возможность образования вторичных наклонных трещин.

#### NATURAL AND THEORETICAL RESEARCHES OF STRESS-STRAIN STATE OF THE LOWER BREAST WALLS OF WATER-DISTRIBUTOR OF ZHAGORSK GAES-2

N.I. Melnikova

Results of analysis of natural observation of the lower breastwalls of water-distributor of Zhagorsk GAES-2 are presented.

KEYWORDS: breast wall, stress-strain state, cracks, finite-element model, reinforcement.