РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННОЙ ПЛОТИНЫ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

Галактионов Д.Е., инженер 1 категории, Вознесенская Н.В., научный сотрудник, Стародубцева Г.Л., научный сотрудник.
ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Санкт-Петербург.

В работе исследуется напряженно-деформированное состояние (НДС) бетонной плотины Богучанской ГЭС в зоне сопряжения с каменно-набросной частью. Так как сооружение возведено в северной строительно-климатической зоне, характеризующейся продолжительной холодной зимой и коротким летним периодом, то большое влияние на НДС бетонной плотины оказывают температурные воздействия. Программный комплекс ABAQUS позволяет решить задачу о напряженно-деформированном состоянии сооружения с учетом переменных тепловых нагрузок на границах и связать их с остальными воздействиями на базе решения задачи термоупругости. Для исследования было выбрано сечение бетонной плотины, которое взаимодействует с каменно-набросной частью плотины. Были учтены следующие факторы:

- график изменения среднесуточных температур воздуха на границах расчетной области, контактирующих с окружающим воздухом (условия конвективного теплообмена);
- температура воды в зоне контакта сооружения с водой;
- конвективный теплообмен с воздухом во внутренних галереях плотины;
- гидростатическое давление воды на упорную грань плотины с учетом графика заполнения водохранилища;
- противодавление воды в зоне контакта плотины и основания;
- гидростатическое давление воды на низовую грань плотины;
- механическое и тепловое взаимодействие бетонной плотины с каменной наброской в зоне контакта.

Расчетная схема

Задача о термонапряженном состоянии плотины Богучанской ГЭС решалась с помощью программного комплекса ABAQUS/Standard, в котором реализован метод конечных элементов (МКЭ). Расчет проводился в плоской постановке для секции 31, схематическое изображение которой приведено на Рис.1. Расчетная область включает в себя бетонную плотину, каменную наброску, состоящую из 3-х слоев, различающихся по своим физико-техническим параметрам (С-1, С-2 и С-3) и скальное основание (слои С-4 и С-5).

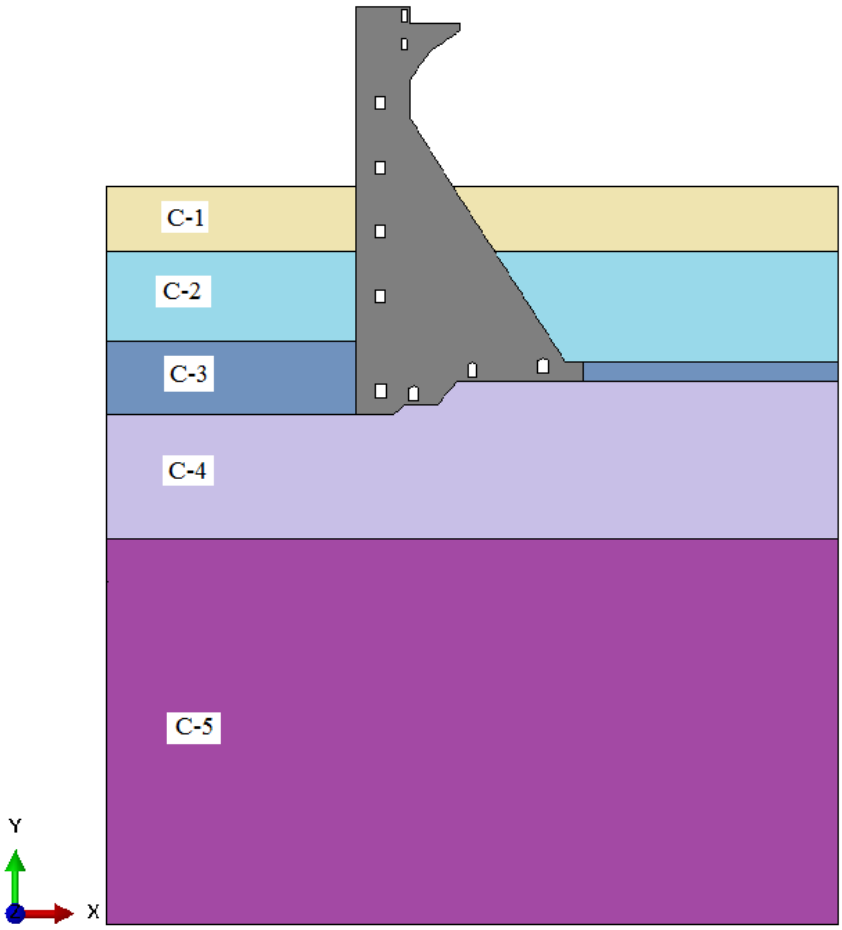

Рис.1 – Расчетная схема

Дискретизация задачи по пространственным координатам предполагает нанесение на расчетную область сетки конечных элементов, которая приведена на Рис.2 и включает с себя 11205 элементов и 23089 узлов. Минимальный шаг сетки 0.25 м.

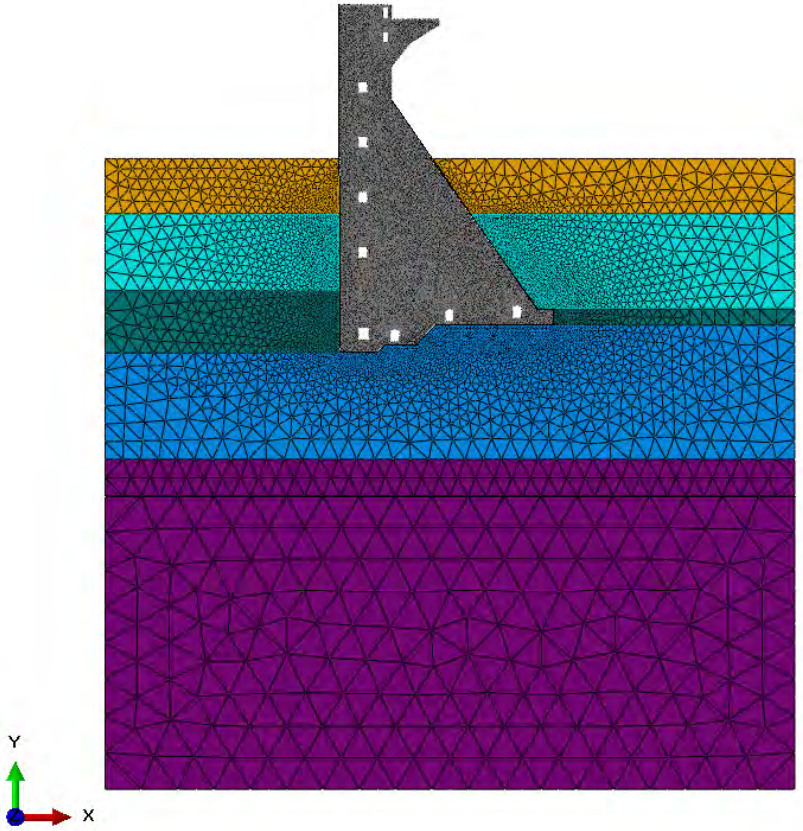

Рис.2 – Сетка конечных элементов

Физико-механические характеристики материалов приведены в Таблице 1. Для расчета напряженно-деформированного состояния грунтов каменной наброски использовалась модель пластичности Кулона-Мора, которая требует задания угла внутреннего трения, сцепления и угла дилатансии. Скальное основание рассчитывалось в рамках упругой модели. Коэффициент линейного расширения бетона $\alpha = 1*10^{-5}$ 1/град.

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов

Материал	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа	Угол дилатансии, град
Бетон	29000	0.14			
Каменная наброска С-1	20	0.3	50	0.1	20
Каменная наброска С-2	50	0.3	50	0.1	20
Каменная наброска С-3	1000	0.25	50	0.1	20
Грунт С-4	3000	0.25			
Грунт С-5	6000	0.25			

Граничные условия и нагрузки

В расчете необходимо было учесть большое количество факторов, определяющих состояние плотины. Были учтены следующие факторы:

1. Климатический фактор в виде изменяющейся во времени температуры окружающего воздуха. График изменения температур за 2010-2013 годы приведен на Рис.3. За начало расчета принят май 2010 года. Этот выбор определялся тем, что температура воздуха в этот период приблизительно равна средней температуре бетонной плотины (+4 С), наблюдаемой на практике за аналогичный период времени после возведения плотины (и определяемой процессом гидратации бетона). При этой температуре был проведен первый расчет в виде стационарного шага, чтобы определить

начальное распределение температур во всей расчетной области, необходимое для дальнейшего исследования. В последующем расчете решалась нестационарная задача с учетом всех изменений во времени граничных условий по температуре и механическим нагрузкам. Весь расчетный период составил 3 года, это период с мая 2010 года по март 2013 года. Теплообмен на границах, контактирующих с наружным воздухом, моделируется граничным условием 3-го рода, т.е. конвективным теплообменом по закону Ньютона с коэффициентом теплоотдачи $\beta_{нар}$=24 ватт/м^2 * град. Коэффициент теплообмена для внутренних помещений плотины (галерей) принят равным $\beta_{внутр}$ = 12 ватт/м^2 * град.

2. Данные наблюдений, которые проводятся средствами контрольно-измерительной аппаратуры в теле плотины и скальном основании. Это, во-первых, температура воздуха в смотровых и цементационной галереях на отметках 123, 145, 160, 175 и 190 метров. Во-вторых, это температуры в местах размещения КИА для мониторинга физических процессов, происходящих в плотине и ее основании: приборы для измерения температур 145, 148, 150 на отметке 133.7 м; 155, 123, 124, 125 на отметке 170 м, 159, 162, 165 на отметке 155.3 м, 163 на отметке 154 м и 204, 205 на отметке 191.3 м. Расположение приборов приведено на Рис. 4. Эти данные использовались при анализе полученных результатов с целью улучшения расчетной модели.

3. График изменения уровней воды в верхнем и нижнем бьефах. Этот фактор должен учитываться, во-первых, при задании гидростатической нагрузки на вертикальную грань плотины в виде изменяющейся во времени величины.

Во-вторых, контакт вертикальной грани плотины непосредственно с водой определяет температуру на этой грани, равную температуре воды в водохранилище в определенный момент времени. Это обстоятельство учитывалось заданием температуры (граничным условием 1-го рода) на вертикальной грани плотины, которое варьировалось во времени по мере наполнения водохранилища.

4. Трение между каменной наброской и бетонными гранями плотины в местах контакта. Коэффициент трения назначен исходя из угла внутреннего трения каменной наброски. Угол внутреннего трения принят равным 50°, тогда коэффициент трения $K_{тр}$ = tgφ = 1.2.

5. Тепловой контакт каменно-набросной и бетонной частей сооружения с характеристиками, относящимися к зазору между этими частями. Величина зазора принята равной 10 см, а тепловая проводимость этой области выбрана как среднее значение от теплопроводностей контактирующих материалов.

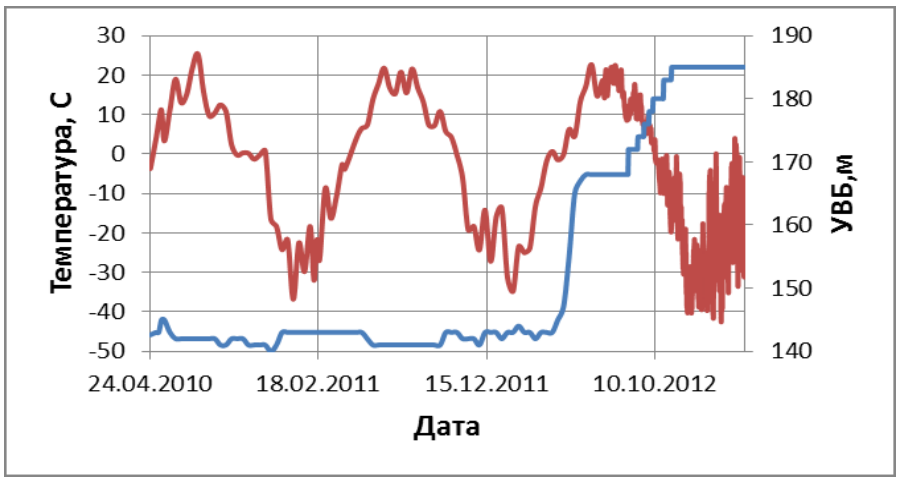

Рис.3 – Температура воздуха по данным наблюдений и подъем уровня верхнего бьефа

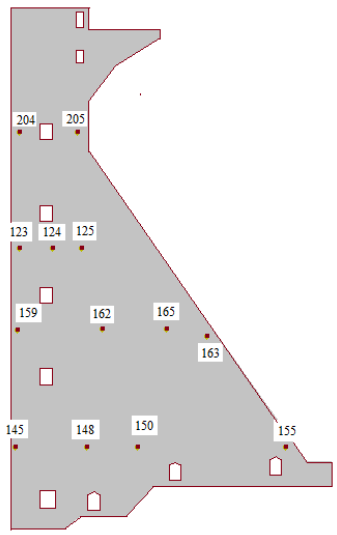

Рис.4 – Размещение КИА в плотине

К настоящему моменту получены и проанализированы данные по температурам внутри бетонной плотины. Результаты расчетов приведены на Рис.5-8. Там же приведены значения температур по данным мониторинга. Из графиков видно, что получены близкие значения для расчетных и наблюдаемых данных.

Поля температур в визуализации ABAQUS'a для самого холодного и самого теплого периодов приведены на Рис.9-10.

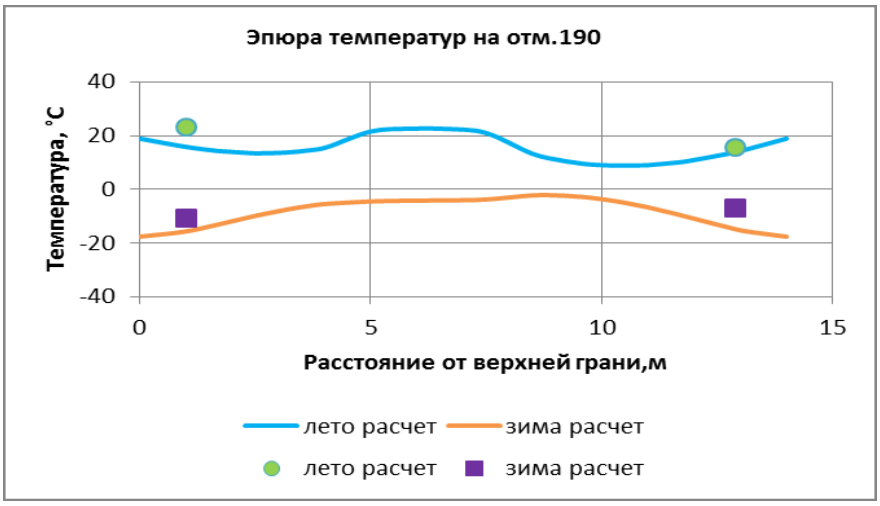

Рис.5 – Температура в плотине на отметке 190 м

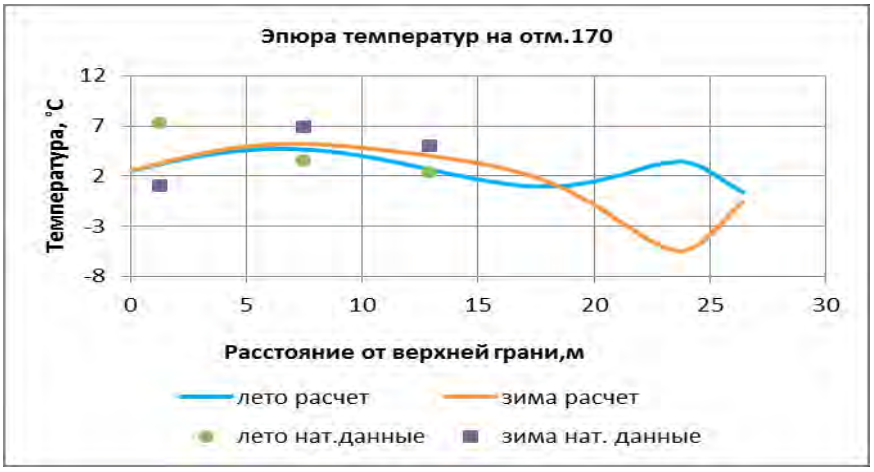

Рис.6 – Температура в плотине на отметке 170 м

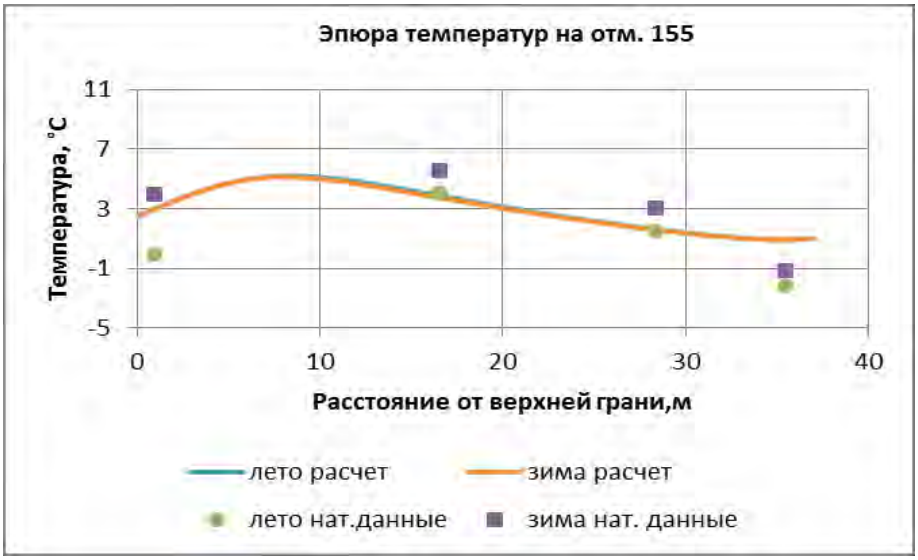

Рис.7 – Температура в плотине на отметке 155 м

Рис.8 – Температура в плотине на отметке 133 м

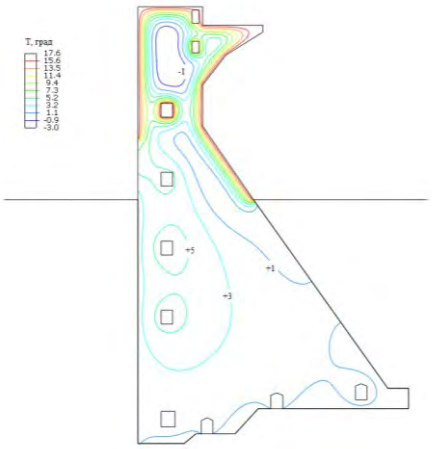

Рис.9 – Распределение температур в плотине летом

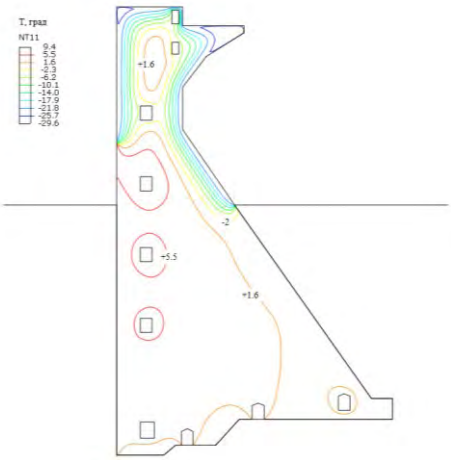

Рис.10 – Распределение температур в плотине зимой

В дальнейшем предполагается проанализировать полученные расчетные данные для других параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние сооружения: величины напряжений и перемещений и сравнить их с данными наблюдений.