

# ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА ФРАГМЕНТА ВОДОСЛИВНОЙ СЕКЦИИ ПЛОТИНЫ

Л.В. КОРСАКОВА, ст. н. с., кандидат технических наук

Д.Е. ГАЛАКТИОНОВ

ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Санкт-Петербург, Россия

## 1. Постановка задачи

Одной из основных проблем, с которыми приходится сталкиваться при строительстве бетонных гидротехнических сооружений, является проблема обеспечения температурной трещиностойкости бетонной кладки в процессе возведения. Образование температурных трещин в массивном бетоне в строительный период связано с разогревом и остыванием бетонной кладки при возведении сооружения. Разогрев бетонной кладки обусловлен тепловыделением в бетоне при экзотермических реакциях гидратации цемента, сопровождающих процесс его твердения. Остывание бетонного массива происходит вследствие теплообмена с окружающей средой. Следует обратить внимание на то, что, если разогрев, обусловленный экзотермией цемента, является, в целом, равномерно распределенным по объему забетонированного блока, то остывание, происходит через поверхности блока. В связи с этим, в случае, если не осуществляется специальных мероприятий по температурному регулированию, у граней блока наблюдаются большие температурные градиенты, что приводит к развитию значительных растягивающих напряжений у наружных граней блоков. Очевидно, что величина температурных градиентов, а, следовательно, и вероятность возникновения трещин определяется уровнем разогрева бетонной кладки с одной стороны, и интенсивностью остывания с другой. Интенсивность остывания в значительной мере определяется климатическими условиями района строительства. Другой причиной образования температурных трещин в строительный период, является стеснение температурных деформаций на контакте вновь уложенного бетона с ранее уложенным «старым» бетоном. При этом, чем больше различаются деформативные характеристики бетонов, тем больше при прочих равных условиях величина температурных растягивающих напряжений.

Для обеспечения условий формирования температурного режима, при котором температурные растягивающие напряжения, возникающие в ходе строительства в массивном бетоне, не приведут к образованию трещин препятствующих нормальной эксплуатации сооружения, разрабатывается комплекс мероприятий по температурному регулированию. Комплекс мероприятий разрабатывается на основе расчетов температурного режима и термонапряженного состояния.

В настоящей статье рассматривается участок плиты водослива плотины Бурейской ГЭС. Решена задача о температурном режиме и термонапряженном состоянии укладываемых блоков с учётом графика возведения.

Для исследования температурного режима и термонапряженного состояния плиты водослива выполнены расчетные исследования фрагмента плотины, включающего шесть блоков плиты водосливной грани, укладываемых на поверхность водосливной секции. Принято, что каждый блок бетонируется частями за 1-3 дня. Последовательность бетонирования блоков приведена в таблице 1.1. Теплофизические характеристики приведены в таблицах 1.2 – 1.4.

Таблица 1.1. Время бетонирования блоков

Блок	Отметка 1	Отметка 2	Дата возведения блока	Время бетонирования блока от 18.06.06
1	195.75	198.06	20-21.06.06	2-3
2	198.06	202.74	18-19.12.06	183-184
3	202.74	207.70	25.12.06	190
4	207.70	212.73	15-17.01.07	211-213
5	212.73	217.46	21-23.01.07	217-219
6	217.46	221.77	30.01.07	227

Таблица 1.2. Теплофизические характеристики бетона

Коэффициент теплопроводности	2,2 ккал/(м·час·град)
Плотность	2,4 т/м <sup>3</sup>
Удельная теплоемкость	0,245 ккал/(кг·град)
Объемная теплоемкость	588 ккал/(м <sup>3</sup> ·град)

Таблица 1.3. Температура экзотермического разогрева

Время, сут	3	5	7	14	28	45
Температура, °С	35.24	41.45	45.32	48.92	50.57	51.54

Таблица 1.4. Модули упругости бетона

Время,сут	3	7	14	28	180	360
Модуль, ГПа	18,0	25,3	28,9	32,5	36,1	38,0

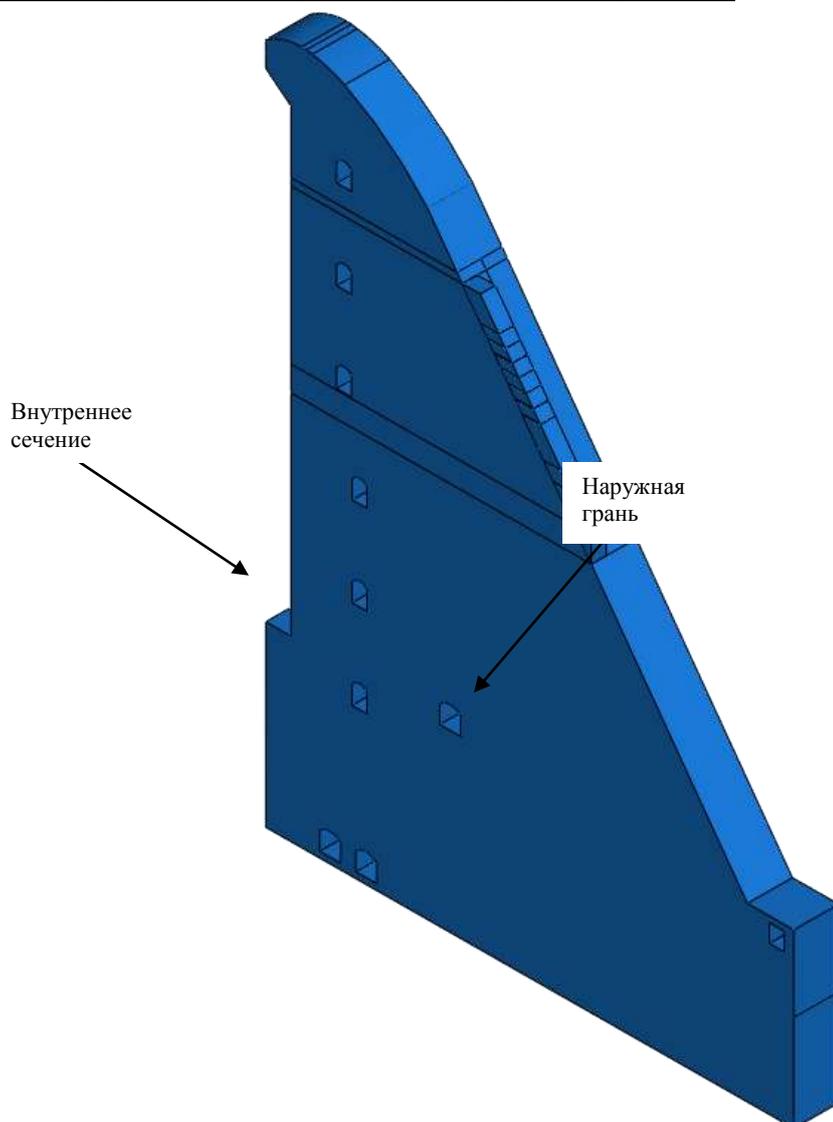


Рис. 1.1. Расчетный фрагмент секции с плитой водосливной грани

## 2. Решение задачи

Задача решается методом конечных элементов с использованием программного комплекса ABAQUS/Standard. Конечноэлементная модель фрагмента водосливной секции плотины состоит из 22000 элементов типа C3D8T (объемный 8-узловой термически связанный элемент с линейной аппроксимацией). Число узлов – 27334 (рис. 2.1).

Температурный режим и напряженное состояние определены из решения связанной задачи теплопроводности и термоупругости. Для моделирования процесса возведения (бетонирование нового блока, обогрев основания, укладка теплоизоляции) выполнено 24 шага. Расчет температуры фрагмента выполнен в период с 20.06.2005 по 22.03.2007. Температура верховой грани принималась равной 4°C. На низовой грани задавались условия конвективного теплообмена с воздухом. При наличии утепленной опалубки коэффициент теплообмена равен 3 ккал/(м<sup>2</sup>·час·град). Поверхности новых блоков утеплялись теплоизоляцией. Поверхность, на которую укладывались новые блоки, обогревалась перед бетонированием в течение суток до температуры 8 °С и утеплялась изоляцией с боков на расстоянии до 1,5 м. Коэффициент теплообмена на теплоизолированной поверхности принимался равным 0,6 ккал/(м<sup>2</sup>·час·град). Блок № 1 укладывался в летнее время и температура бетонной смеси, укладываемой в блок № 1, составляла 18°C. Температура бетонной смеси, укладываемой в блоки №№ 2-6 составляла 10°C.

Технологические мероприятия по регулированию температурного режима – обогрев поверхности, на которую укладывается бетон, теплоизоляция блоков и примыкающей к ним полосы штрабленной поверхности,

учитываются при помощи меняющихся на каждом шаге температурных граничных условий (в том числе, переменной границы) (рис. 2.2).

С учетом особенностей технологии возведения при решении поставленной задачи возникает ряд трудностей:

- Отдельные блоки возводятся в разное время. Поскольку в программе ABAQUS/Standard отсутствует понятие **create** (создание) элемента или области, эта проблема решается с помощью пользовательской подпрограммы, в которую передается время создания элементов. Для “неработающих” элементов задаются нулевой коэффициент теплопроводности и близкий к нулю модуль упругости.

- Модуль упругости бетона возводимых блоков изменяется со временем. Поскольку в интерфейсе программы ABAQUS/Standard отсутствует возможность задавать зависимость модуля упругости от времени с помощью графиков (опция **Tools**→**Amplitude**), эта возможность также реализуется с помощью пользовательской подпрограммы **UMAT**.

- Температура окружающей среды задается глобальным табличным графиком зависимости от времени. При использовании опции **Step Time** и одинаковых графиков автоматически устанавливается опция **Propagated** и параметры продолжают по последнему значению. Приходится применять искусственный прием для установки опции **Modified**.

- Сложность для температурной задачи также заключается в разном времени возведения блоков, изменении границы и условий на ней. Отсутствует механизм выключения внутренних границ в процессе решения.

Экзотермический разогрев бетона при его твердении задается графиками объемного теплового потока в соответствии с последовательностью возведения блоков. При расчете напряженного состояния плиты водосливной грани в период бетонирования в качестве воздействий приняты приращение температур бетона и вес блоков водосливной грани, бетонизируемых в рассмотренный период.

Новые блоки моделируются отдельными фрагментами, которые соединяются с поверхностью ранее возведенного участка плотины при помощи связей (tie). На нижней грани фрагмента плотины заданы кинематические ограничения по трем компонентам (заделка). Боковые грани поверхности ранее возведенного фрагмента закреплены от смещений в направлении нормалей (ползун). Боковые грани новых блоков – свободны.

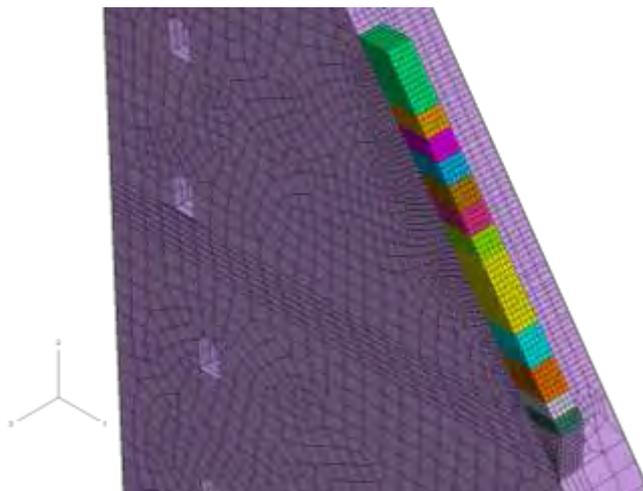


Рис. 2.1. Фрагмент КЭ модели водосливной секции плотины

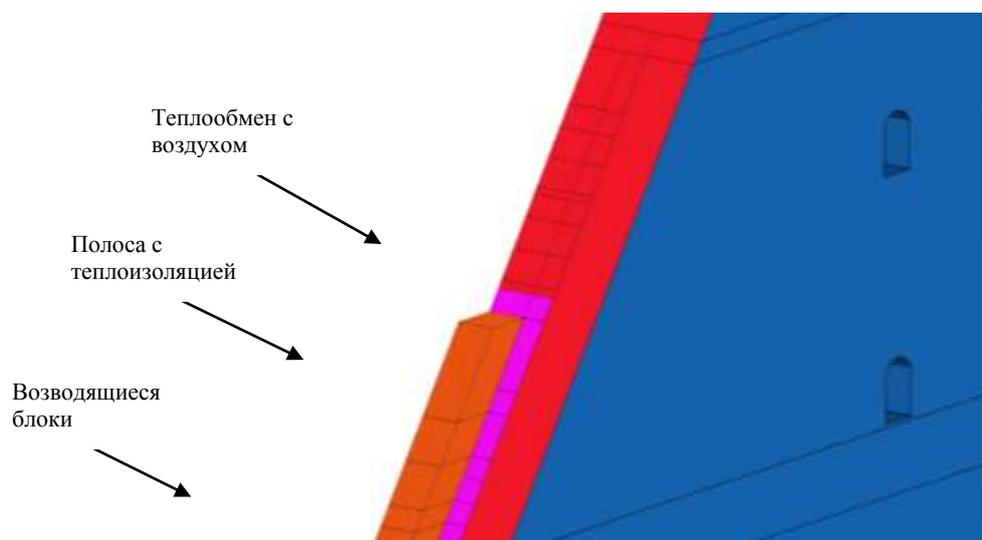


Рис. 2.2. Температурные граничные условия

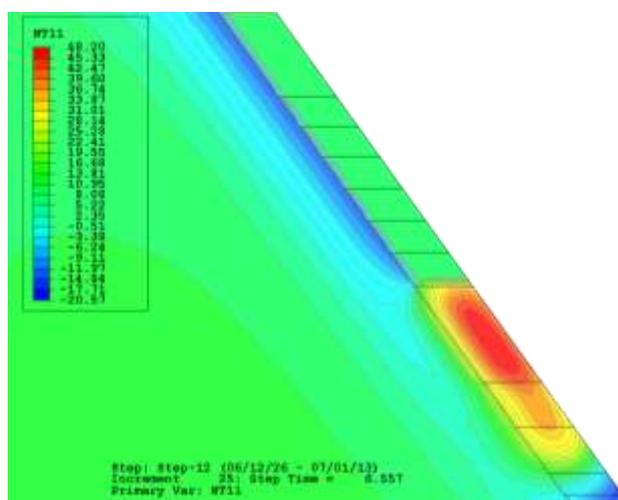


Рис. 3.1. Температура нижней грани водосливной секции 31.12.2006 при максимальном разогреве блока №3

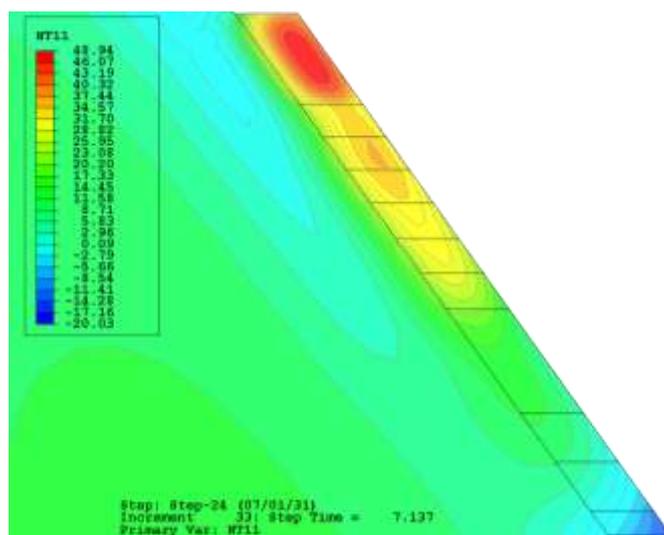


Рис. 3.2. Температура нижней грани водосливной секции 06.02.2007 при максимальном разогреве блока №6

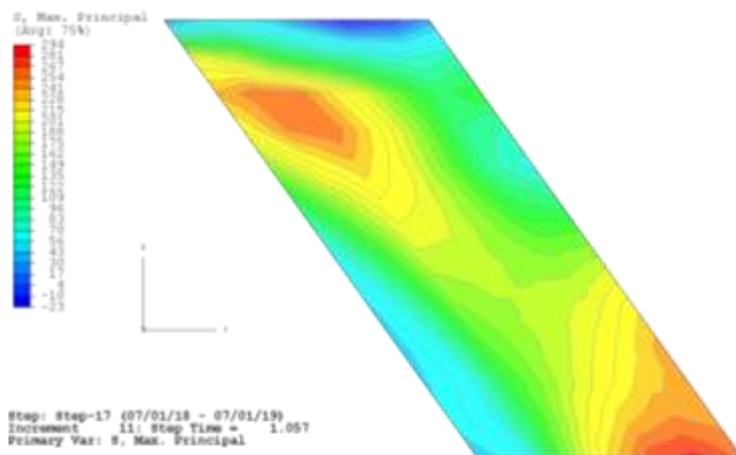


Рис. 3.3. Блок №3, среднее сечение. Макс. главные напряжения  $\sigma_1$  (МПа) 18.01.2007 (24-ый день от возведения блока)

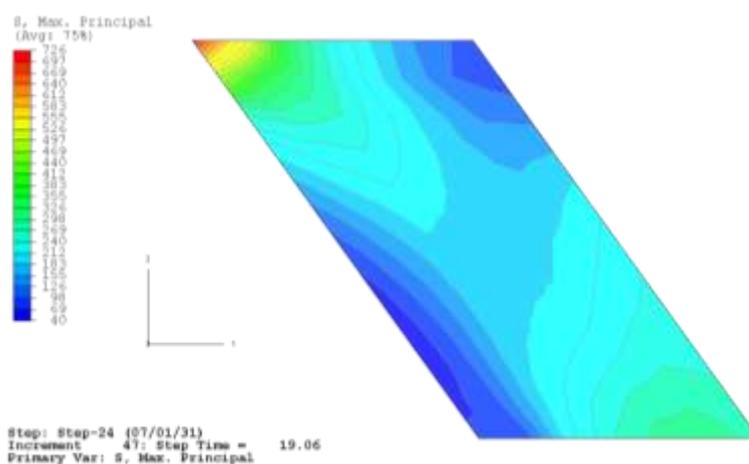


Рис. 3.4. Блок №6, среднее сечение. Макс. главные напряжения  $\sigma_1$  (МПа) 18.02.2007 (20-ый день от возведения блока)

### 3. Результаты и выводы

Проведённые расчёты позволяют оценить температурный режим и термонапряжённое состояние расчетного фрагмента плотины. В частности, возможную картину трещинообразования.

Характер напряжённого состояния блоков №3 и №6 показывает (рис. 3.3-3.4), что первоначально зона трещин может образоваться на границе с основанием в верхних левых углах.

При перерыве в бетонировании свыше 10 – 20 дней в верхних углах блоков возникает зона концентрации растягивающих напряжений, что может явиться причиной развития трещин в зоне контакта со старым бетоном.

Максимальные растягивающие напряжения наблюдаются не внутри фрагмента, а на наружной боковой грани. Напряжения во внутреннем сечении фрагмента к моменту возведения последнего блока уменьшаются, но возрастают с наружной стороны до 8-9 МПа.

Анализ главных напряжений показал, что первые трещины могут образоваться в процессе бетонирования плиты в блоках уже в раннем возрасте. Появление трещин может существенно изменить картину напряжённого состояния всей плиты и привести к уменьшению напряжений в нижних блоках, что следует учитывать при дальнейшем исследовании проблемы.