

# РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА МАССИВНЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ

И.В. Добрецова, Д.Е. Галактионов

ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург, Россия

Температурные напряжения в массивных железобетонных конструкциях обусловлены температурными деформациями при разогреве конструкции вследствие экзотермических процессов, сопровождающих процесс твердения бетона, и ее последующим остыванием под воздействием теплообмена с окружающей средой. Чем массивнее конструкция, тем длительнее этот процесс. Уровень максимальных температур в конструкции зависит, в значительной степени, от массивности конструкции. Для монолитных массивных конструкций характерно, что экзотермический разогрев и остывание бетона конструкции происходят при разных значениях модуля деформаций бетона. Поэтому напряжения, возникающие в процессе разогрева и остывания бетона различны.

Особенностью массивных монолитных железобетонных сооружений, является то, что в строительный период, вследствие температурного разогрева элементов конструкции при их бетонировании возникают значительные технологические (температурные) растягивающие напряжения, которые могут явиться причиной появления температурных трещин. Образование температурных трещин может привести к изменению эксплуатационных характеристик конструкции.

Величина температурных растягивающих напряжений определяется разогревом бетонной кладки, интенсивностью ее остывания, а также степенью ограничения свободных температурных деформаций. Ограничение свободных температурных деформаций связано как с неравномерностью распределения температуры по сечению самой конструкции, так и с защемлением ее в основание или другие конструктивные элементы.

Для монолитных бетонных и железобетонных конструкций плитного типа неравномерность распределения температуры по высоте зависит в значительной степени от их высоты. Интенсивность остывания определяется, главным образом, разностью между максимальной температурой бетона в конструкции при разогреве и температурой окружающей среды и зависит от условий теплообмена с окружающей средой.

Одним из обязательных требований при возведении массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций является ограничение температурного трещинообразования в бетоне в строительный период. Для ограничения температурного трещинообразования в бетоне обычно предусматривается специальный комплекс мероприятий по температурному регулированию. Регулирование температурного режима осуществляется за счет варьирования температуры бетонной смеси, размеров блоков бетонирования, условий теплообмена с окружающей средой (мощность теплоизоляции, сроки ее установки) в зависимости от температуры окружающей среды. Параметры этого комплекса зависят от размеров конструкции, теплофизических и физико-механических характеристик бетона.

Для выбора параметров были проведены расчетные исследования температурного режима и термонапряженного состояния перекрытия при различных условиях бетонирования и выдерживания бетона в первый месяц после укладки.

Расчетная модель представлена на рис. 1.

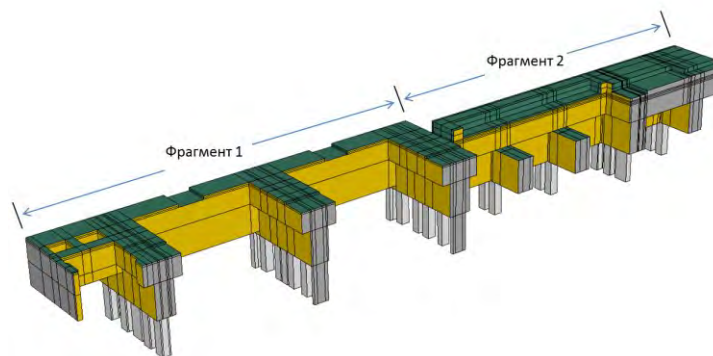


Рис. 1 - Расчетная схема

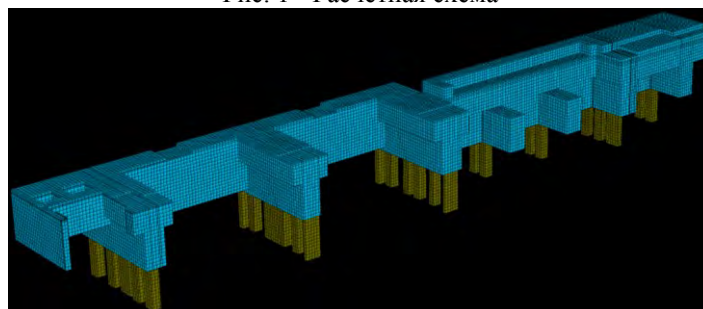


Рис. 2 - Сетка конечных элементов расчетной области

Общая длина плиты перекрытия составляет 73,615 м. Т.к. для корректного учета температурных изменений в плите, вызванных изменения во времени интенсивности тепловыделения и модуля деформаций бетона, требуется достаточно мелкая сетка и маленькие шаги по времени, было решено разбить модель на два фрагмента. Размеры фрагмента №1 в

плане 52,38x13,7 м, фрагмента №2 - 21,235x 8,5 м. Максимальная высота ригелей порядка 4 м. Максимальная толщина поперечных ригелей в верхней части 2,2 м, продольных - 1,5 м.

На рис. 2 представлена разбивка расчетной области на конечные элементы. Всего расчетная область разбита на 82560 элементов, тип элементов: C3D8T. Число узлов: 98473.

#### Теплофизические характеристики используемых материалов

##### Характеристики бетона плиты перекрытия

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	2,04
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	1,0
Температурный коэффициент линейного расширения, °С <sup>-1</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	2500
Коэффициент Пуассона	0,15

##### Адиабатический подъем температуры, °С

Ц, кг/м <sup>3</sup>	время, сут.									
	0	1	2	3	5	7	11	14	21	28
350	0,0	25,7	40,8	46,2	51,2	54,4	58,0	59,8	61,3	62,5

##### Модуль упругости бетона в зависимости от возраста

Возраст, сут.	0	1	3	5	7	14	28
Еб, ГПа	0	17	24	27,3	29,2	31,3	33,1

#### Основные характеристики расчётных вариантов

Предполагалось, что фундамент возводится мгновенно одним блоком при температуре окружающей среды +10 °С. Предполагается также, что в случае бетонирования зимой весь фундамент, включая опоры, находится в закрытом помещении, в котором поддерживается искусственный климат с постоянной температурой +10 градусов.

Температура бетонной смеси в блоке после окончания внутриблочных работ принималась равной +15°С.

Опираание плиты перекрытия смоделировано колоннами, основание которых закреплено только от вертикальных перемещений. Модуль упругости опор принят равным 2 ГПа.

Было сделано несколько вариантов расчета с учетом моделирования опирания плиты перекрытия и рассмотрения термонапряженного состояния отдельных ее частей (поперечного ригеля, отдельно фрагмента №1 и отдельно фрагмента №2). Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса [ABAQUS/Standard](#). Решалась объемная задача. Длительность расчетов составляла от нескольких часов (для короткого ригеля) до нескольких суток (для всего фундамента с учетом симметрии).

Были рассмотрены различные варианты выдерживания блока, отличающиеся условиями теплообмена с окружающей средой.

В данной статье представлен один из вариантов, характеризующий наиболее благоприятное термонапряженное состояние блока при его остывании. В этом варианте все поверхности плиты перекрытия с момента возведения и до конца расчетного периода (28 суток) находятся под защитой теплоизоляции с одинаковым коэффициентом теплопередачи  $\beta = 0,7$  ккал/м<sup>2</sup>ч°С.

Результаты расчетов приведены на рис. 3-8. Построены поля горизонтальных напряжений (т/м<sup>2</sup>) разного направления (вдоль короткой стороны S22, вдоль длинной стороны – S11) на разные моменты времени от начала возведения.

Для областей на боковых поверхностях фундамента, где наблюдаются максимальные растягивающие напряжения, приведены графики изменения во времени температур и напряжений (МПа).

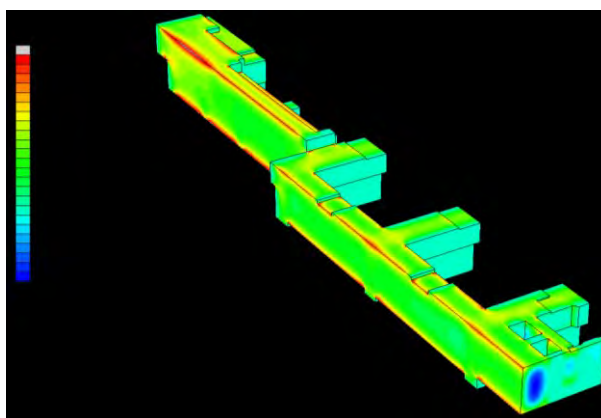


Рис. 3 - Распределение напряжений в плите на 3-и сутки, т/м<sup>2</sup>

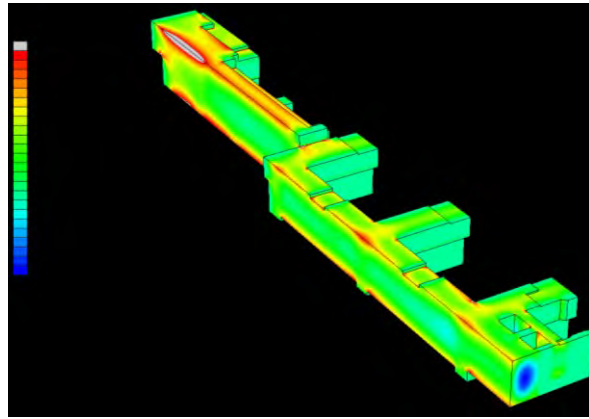


Рис. 4 - Распределение напряжений в плите на 7-е сутки, т/м<sup>2</sup>

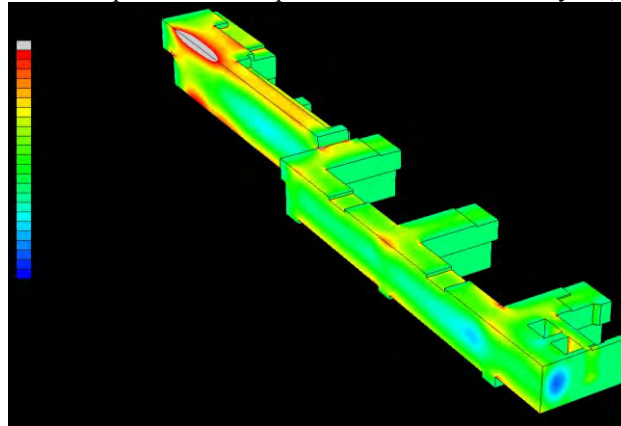


Рис. 5 - Распределение напряжений в плите на 14-е сутки, т/м<sup>2</sup>

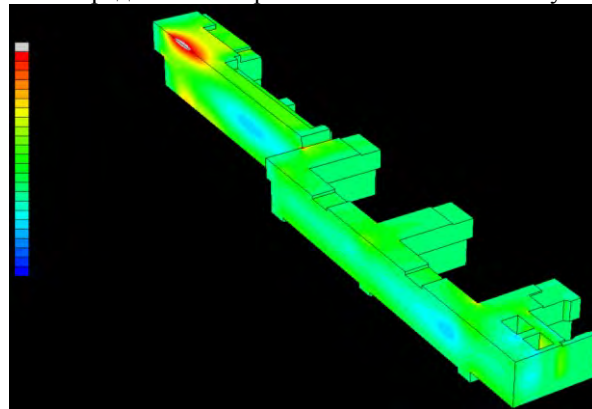


Рис. 6 - Распределение напряжений в плите на 28-е сутки, т/м<sup>2</sup>

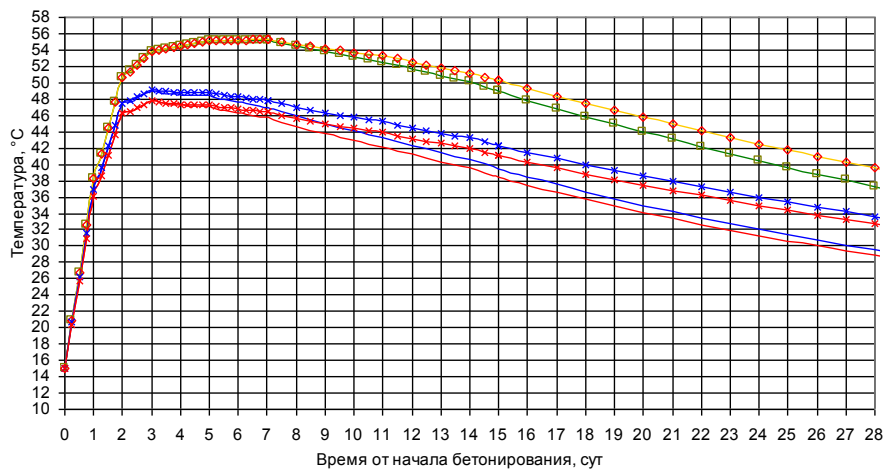


Рис. 7 - Изменение во времени температур на наружной боковой поверхности 2-го фрагмента в различных точках по высоте

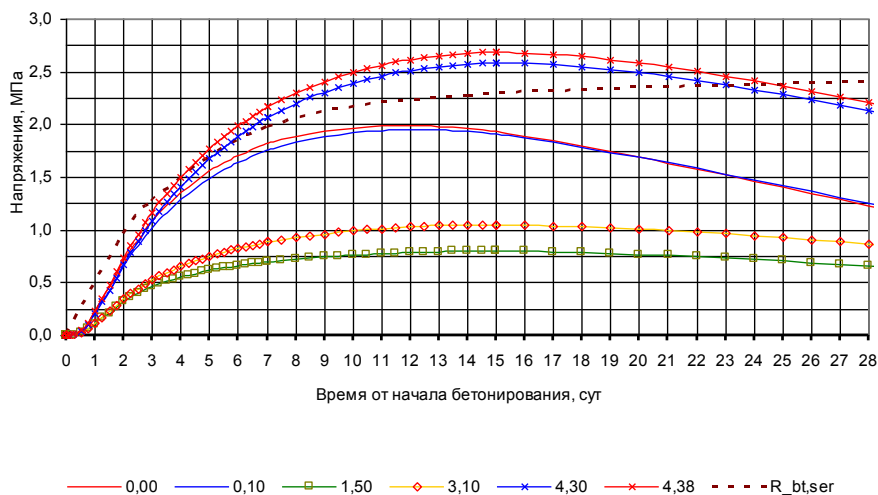


Рис. 8 - Изменение во времени напряжений S11 (МПа) на наружной боковой поверхности 2-го фрагмента в зоне максимальных растягивающих напряжений

### Выводы

В зависимости от условий выдерживания значения максимальных температур и напряжений изменяются в широких пределах. На основании анализа температурного режима и термонапряженного состояния были определены варианты расчетов. В рекомендованном варианте, представленном на предыдущих слайдах, за счет соответствующего утепления наружных граней конструкции удалось обеспечить температурную трещиностойкость конструкции в целом, за исключением зон концентрации напряжений.

В этом варианте выдерживания блока максимальные температуры на поверхности блока (под теплоизоляцией достигались на 6-7 сутки) составили 62 градуса. В центре плиты фрагмента №2 температуры примерно на 6 градусов выше (68 градусов), в зонах сопряжения ригелей 64 градуса.

В других рассмотренных вариантах (при более высокой скорости остывания) неизбежно возникают растягивающие напряжения, превышающие допустимые значения для бетона класса В25.

Для фрагмента №2 было рекомендовано дополнительное утепление. После этого остывание плиты идет гораздо медленнее и напряжения практически не превышают допустимых значений.