

# РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЕКЦИИ ВОДОВОДА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2

Гинзбург С. М., к. т. н., Онищук В. С., младший научный сотрудник  
ОАО «ВНИИГ им Б. Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург, Россия

## Постановка задачи

Известно, что процесс твердения бетона сопровождается выделением тепла, вызванным реакцией гидратации цемента. В результате бетонный блок разогревается до температуры, резко отличающейся от температуры окружающей среды. Поскольку система бетон-среда с течением времени стремится к тепловому равновесию, в бетонном массиве от точки к точке наблюдаются различные температуры, то есть тепло в блоке распределяется неравномерно. Это влечет за собой возникновение зон растяжения и сжатия бетона с соответствующим напряженным состоянием. Слишком большие напряжения (больше предела прочности) вызывают трещины в бетоне. Для того чтобы обеспечить температурную трещиностойкость блока, необходимо создать благоприятные температурные условия его бетонирования и ухода за ним.

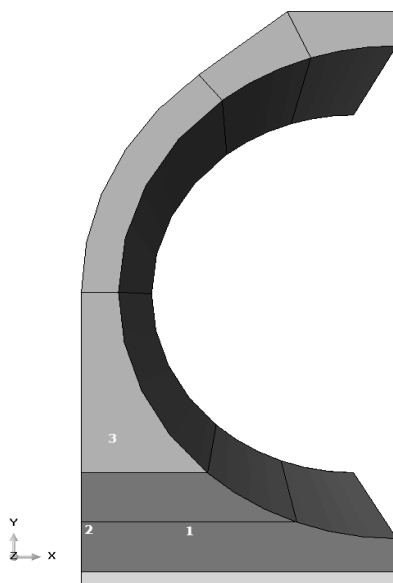


Рис. 1

## Исходные данные

В данной работе рассматривается температурный режим и термонапряженное состояние фрагмента сталебетонного водовода применительно к условиям бетонирования Загорской ГАЭС-2. Фрагмент водовода имеет длину 8 м. Диаметр стальной трубы составляет 7.5 м. Толщина стальной трубы и бетонной оболочки равны соответственно 25 мм и 0.5 м. Задача состоит в том, чтобы определить термонапряженное состояние бетонируемого участка водовода и установить параметры бетонирования и ухода за бетоном, обеспечивающие температурную трещиностойкость.

## Основные параметры бетонирования

Фрагмент водовода возводится в два яруса по высоте. Высота первого яруса составляет 1.5 м, высота второго – 7 м. При этом график бетонирования и ухода за бетоном включает следующие этапы:

1. Укладка первого яруса;
2. Через сутки устанавливается теплоизоляция с коэффициентом теплообмена  $\beta$  (температура воздуха равна  $T_a$ );
3. Через время  $\tau$  (интервал перекрытия ярусов) снимается теплоизоляция с нижнего яруса и устанавливается опалубка для верхнего;
4. Через 12 часов возводится верхний ярус;
5. Через сутки оба яруса накрываются тем же теплоизоляционным материалом.

Как уже отмечалось, цель работы состоит в том, чтобы определить допустимые с точки зрения температурной трещиностойкости параметры бетонирования и ухода за сооружением. В качестве таких параметров рассматривались следующие три:

1. время перекрытия  $\tau$  ярусов бетонирования,
2. коэффициент теплообмена  $\beta$  между бетоном и окружающей средой (воздухом),
3. температура воздуха  $T_a$ .

При этом указанные параметры можно разделить на две группы:

1. управляемые ( $\tau$ ,  $\beta$ ),
2. неуправляемые ( $T_a$ ).

Заранее неизвестно какими реально будут неуправляемые параметры в момент бетонирования блока, но можно предположить, что они принимают значения из некоторого диапазона. Так, для температуры воздуха был взят диапазон  $T_a \in [5; 25]^\circ\text{C}$ , что соответствует периоду лето-осень. Задача состоит в том, чтобы обеспечить температурную

трещиностойкость сооружения при любых возможных значениях управляемых параметров за счет регулирования управляемых, поэтому для последних также устанавливается диапазон допустимых значений. Из технологических соображений нами были взяты следующие диапазоны:  $\tau \in [4; 10]$  сут.,  $\beta \in [1; 5]$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

### Характеристики бетона в раннем возрасте

На рис. 2 представлен график адиабатического разогрева бетона.

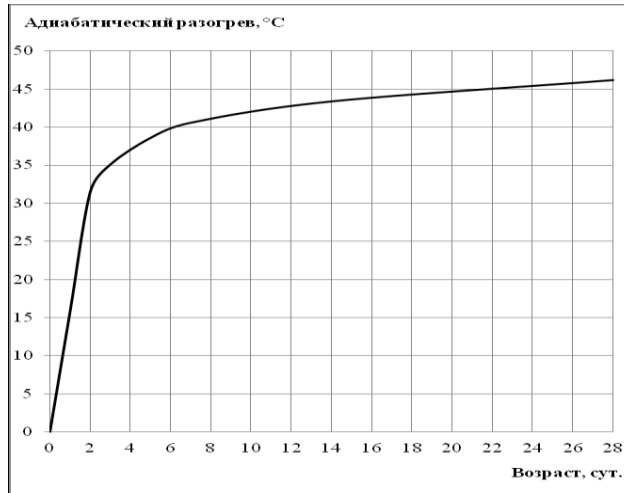


Рис. 2

На рис. 3 изображены графики изменения модуля Юнга и прочности.

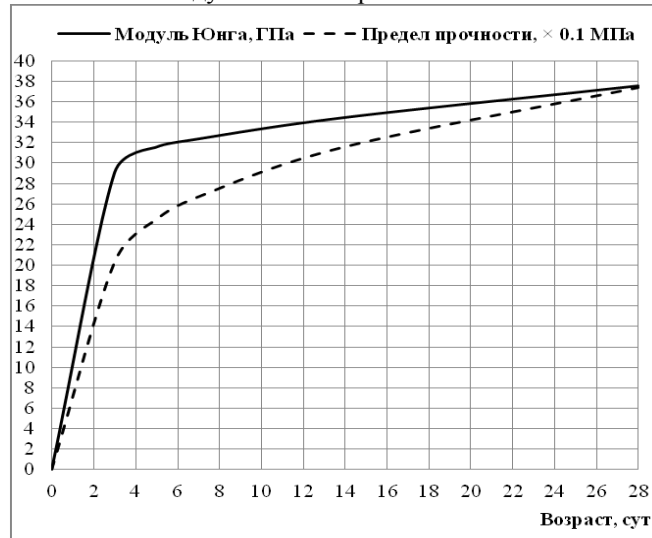


Рис. 3

### Модель конечных элементов

Все расчеты проводились с помощью программы ABAQUS/Standard. В расчетах использовалось два типа конечных элементов: для бетонной оболочки – элементы C3D8T, для стальной трубы – элементы S4RT.

*Тип C3D8T* – гексаэдрические элементы с линейной интерполяцией температур и перемещений.

*Тип S4RT* – линейные четырехугольные элементы для задачи термоупругости.

К оболочке применялось численное интегрирование по методу Симпсона с пятью точками по толщине.

Число узлов сетки – 90487;

Общее число элементов – 87120;

Из них элементов типа C3D8T – 82080;

Элементов типа S4RT – 5040.

### Метод оценки области допустимых параметров

Пусть бетонный массив занимает в пространстве область  $\Omega$ .

$\sigma(x, t)$  – напряженное состояние бетона (решение исходной задачи термоупругости). Здесь  $x$  – координата точки области  $\Omega$ , а  $t$  – возраст бетона.

Назовем величину  $E(x) = \max_{0 \leq t \leq \tau} (\sigma(x, t) - R(t))$  выбросом напряжения  $\sigma$  за предел прочности  $R$  в точке  $x$  (далее, просто выброс).

Построим аппроксимирующий полином в пространстве двух параметров  $z_1$  и  $z_2$ :

$$P(z_1, z_2) = A + B_1 z_1 + B_2 z_2 + C z_1 z_2 + D_1 z_1^2 + D_2 z_2^2,$$

где  $-1 \leq z_1, z_2 \leq 1$ ,  $z_i = \frac{2s_i - A_i - B_i}{B_i - A_i}$ ,  $A_i \leq s_i \leq B_i, i = 1, 2$ .

Здесь  $s_i$  – истинный, а  $z_i$  – приведенный параметр.  $[A_i; B_i]$  – это промежуток, в пределах которого берется параметр  $s_i$ .

Коэффициенты полинома  $P$  определяются методом наименьших квадратов (МНК):

$$\sum_{k=1}^n [E_k - P_k(Z^{(k)})]^2 \rightarrow \min, Z = (z_1, z_2),$$

где  $E_k$  – величина выброса  $E(x)$  в некоторой заранее выбранной точке  $x$  при фиксированном наборе параметров  $Z = (z_1, z_2) = (z_1^k, z_2^k) = Z^{(k)}$ . Таким образом, полином  $P(z_1, z_2)$  аппроксимирует величину выброса  $E(x)$  в некоторой точке  $x$ .

Уравнение  $P(z_1, z_2) = 0$  задает кривую второго порядка на плоскости  $z_1 O z_2$ . Эта кривая делит плоскость на две части: где  $P(z_1, z_2) < 0$  (т.е. соответствующие напряжения меньше предела прочности) и где  $P(z_1, z_2) \geq 0$  (т.е. напряжения больше предела прочности). Первое множество соответствует допустимым параметрам, второе – недопустимым. Чтобы обеспечить трещиностойкость блока, необходимо обеспечить ее для всех точек блока. Поскольку в каждой точке  $x$  модельной области  $\Omega$  полином  $P$ , вообще говоря, разный, то для всех полиномов нужно построить множество  $P(z_1, z_2) < 0$  и взять пересечение этих множеств. Полученное пересечение и будет множеством допустимых с точки зрения трещиностойкости параметров (сразу для всех точек блока).

### Результаты

Для решения практических задач в ряде случаев целесообразно строить полином  $P(z_1, z_2)$  не для всех точек  $x$  области  $\Omega$ , а только для некоторых, поэтому выберем такие три точки, в которых величина выброса наибольшая. Эти точки отмечены на рис. 1. Во всех расчетах температура бетонной смеси принималась равной  $T_c = 15^\circ\text{C}$ .

Таблица 1

Вариант, №	$\tau$ , сут.	$T_a$ , °C	$\beta$ , ккал/(час·м <sup>2</sup> ·°C)	$E = \max_{0 \leq t \leq \tau} (\sigma(x, t) - R(t))$ , МПа		
				Внутри 1-го яруса	Граница 1-го яруса	Внутри 2-го яруса
1	7	5	1	-0.20	0.36	-0.47
2	7	5	3	-0.23	-0.35	0.98
3	7	5	5	0.06	-0.38	1.58
4	7	15	1	-1.10	0.06	-1.73
5	7	15	3	-1.27	-0.53	-0.40
6	7	15	5	-1.06	-0.55	0.11
7	7	25	1	-2.00	-0.26	-2.98
8	7	25	3	-2.31	-0.70	-1.90
9	7	25	5	-2.06	-1.71	-1.60
10	4	5	1	-0.76	1.37	-1.33
11	4	5	3	0.10	0.16	-0.01
12	4	5	5	0.59	-0.13	0.55
13	10	5	1	0.36	-0.29	0.00
14	10	5	3	0.88	-0.35	1.47
15	10	5	5	1.26	-0.38	1.80
16	8.5	5	1	0.11	-0.11	-0.27
17	8.75	5	1	0.15	-0.18	-0.20
18	9	5	1	0.20	-0.25	-0.16

На рис. 4 представлена область допустимых параметров (выделена серым цветом) при условии, что время перекрытия ярусов составляет 7 суток. По горизонтальной оси отложена величина  $T_a - T_c$  (температура воздуха минус температура бетонной смеси, °С); по вертикальной оси отложен коэффициент теплообмена  $\beta$ , Вт/(м<sup>2</sup> · °С)

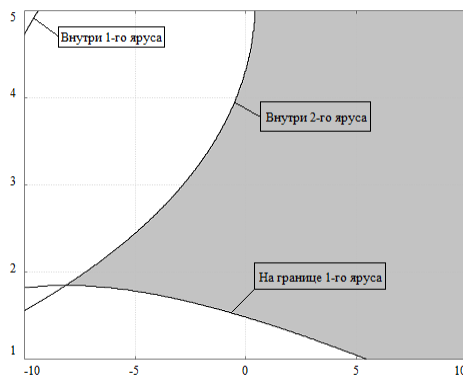


Рис. 4

Из рисунка видно, что при температуре воздуха  $T_a$  большей, чем температура бетонной смеси  $T_c$ , необходимо обеспечить коэффициент теплообмена от 2 до 5 Вт/(м<sup>2</sup> · °С). Если разница температур лежит в диапазоне от -8 до 0°С, то надо брать  $\beta = 2$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Если  $T_a - T_c = -10$ °С, то найти  $\beta$  из рассматриваемого диапазона при условии, что время перекрытия ярусов – 7 суток, нельзя, поэтому для данного случая (при  $T_a - T_c = -10$ °С) следует варьировать не только коэффициент теплообмена  $\beta$ , но и время перекрытия ярусов  $\tau$ .

На рис. 5 выделена область допустимых параметров при условии, что разница температур  $T_a - T_c$  составляет -10°С. По горизонтальной оси отложено время перекрытия ярусов  $\tau$ , сутки; по вертикальной оси – коэффициент теплообмена  $\beta$ , Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

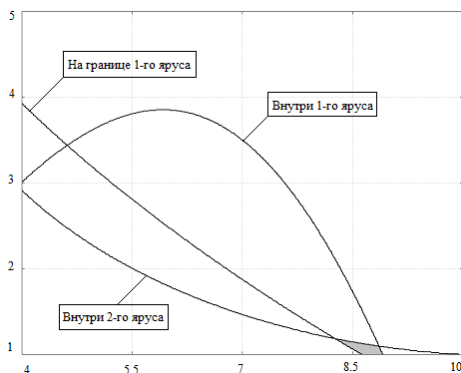


Рис. 5

Из данного рисунка видно, что, согласно описанному методу, при разности температур  $T_a - T_c = -10$ °С коэффициент теплообмена следует установить равным 1 Вт/(м<sup>2</sup> · °С), а время перекрытия ярусов – 8.5 ÷ 9 суток. Последние три строчки таблицы 1. говорят о том, что при таких параметрах бетонирования трещиностойкость внутри первого яруса на самом деле не обеспечивается. Несоответствие построенной области результатам расчетов вызвано, во-первых, погрешностью аппроксимации предложенного метода и, во-вторых, выбором диапазона для того или иного параметр (возможно, для некоторого параметра стоит рассмотреть другой диапазон значений, при котором допустимая область была бы шире).

### Выводы

На основании серии расчетов, проведенных в ABAQUS/Standard, были установлены допустимые в смысле трещиностойкости параметры бетонирования блока (время перекрытия ярусов и коэффициент теплообмена) в зависимости от температуры наружного воздуха. Так, в летний и осенний периоды были даны разные рекомендации:

1. Летний период (температура воздуха  $T_a = 15 \div 25$ °С)

Рекомендации:

время перекрытия ярусов  $\tau = 7$  сут;

коэффициент теплообмена  $\beta = 2 \div 5$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

2. Осенний период (температура воздуха  $T_a = 5 \div 15$ °С)

Рекомендации:

время перекрытия ярусов  $\tau = 8.5 \div 9$  сут.;

коэффициент теплообмена  $\beta \leq 1$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Таким образом, нами были получены все необходимые графики напряжений при различных факторах, найдено множество условий, которые отвечают требованию трещиностойкости, и даны соответствующие рекомендации.

### Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
2. Плят Ш. Н. Расчеты температурных полей бетонных гидросооружений.
3. Плят Ш. Н., Гинзбург С. М. Математическая модель для оценки термической трещиностойкости бетонного массива в строительный период.