

К вопросу моделирования температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных плит

Ю.И. Корянова¹, Г.В. Несветаев¹, А.С. Чепурненко¹, Д.П. Сухин²

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²ООО «Дон-Кубань Строй», Ростов-на-Дону

Аннотация: Обоснована целесообразность применения моделирования при помощи метода конечных элементов для исследования влияния некоторых рецептурно-технологических факторов на результирующие температурные поля и температурные напряжения при возведении массивных фундаментных плит. Рассмотрена упрощенная методика определения температурных напряжений, основанная на сведении трехмерной задачи к одномерной на основе гипотезы плоских сечений. Предложена зависимость и обоснованы количественные значения параметров для расчета кинетики тепловыделения бетона в температурно-усадочном блоке. В результате реализации численного эксперимента по влиянию продолжительности перерывов между перекрытием слоев, температуры среды и бетонной смеси, класса и кинетики твердения бетона, параметров теплоотдачи, получены зависимости уровня растягивающих напряжений от указанных факторов во времени. Показано, что при разработке технологических регламентов бетонирования определение технологических параметров (интенсивность укладки смеси, термическое сопротивление опалубки, устройство рабочих швов и др.) невозможно без учета кинетики твердения бетона, определяемой рецептурными особенностями бетонных смесей.

Ключевые слова: массивные монолитные конструкции, температурные поля и напряжения, рецептурно-технологические факторы, тепловыделение бетона, напряженно-деформированное состояние.

Согласно СП 435.1325800.2018, п. 10.6 «в массивных монолитных конструкциях следует предусматривать мероприятия по уменьшению влияния температурно-влажностных полей напряжений, связанных с экзотермией при твердении бетона, на целостность и трещиностойкость конструкций». Важность таких мероприятий подтверждается опытом возведения массивных конструкций с применением рецептурного регулирования температурных полей [1]. Вышесказанное предопределяет актуальность исследований в области регулирования температурного режима твердения и предотвращения раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций. Современная технология позволяет получать посредством рецептурного регулирования высокофункциональные бетоны с требуемым уровнем свойств при

обеспечении технологических показателей бетонных смесей в широком диапазоне [2]. Поскольку, согласно СП 70.13330.2012, п. 5.4.2 предписываются «в массивных монолитных конструкциях ... мероприятия по уменьшению влияния температурно-влажностных полей напряжений», но при этом сами мероприятия не оговариваются, необходимость разработки принципов управления рисками раннего трещинообразования массивных монолитных конструкций назначением требуемых и рецептурных, и технологических параметров, сомнений не вызывает. Учитывая многочисленность рецептурно-технологических факторов, оказывающих влияние на рассматриваемые процессы, становится очевидной целесообразность применения при разработке технологических регламентов бетонирования моделирования температурных полей и напряжений при помощи численных методов [3-5]. В работе предлагается упрощенная методика оценки напряженно-деформированного состояния на ранней стадии возведения массивной монолитной железобетонной плиты, основанная на сведении трехмерной задачи к одномерной за счет учета некоторых характерных особенностей напряженно-деформированного состояния, для прогнозирования риска раннего трещинообразования при помощи методов компьютерного моделирования. Алгоритм расчета температурных напряжений представлен следующей последовательностью операций:

- расчет температурных полей с учетом кинетики тепловыделения бетона, условий теплообмена и температуры окружающей среды;
- расчет прочностных и деформативных показателей бетона на основе определения степени зрелости бетона по результатам расчета температурных полей;
- расчет температурных напряжений, вызванных неравномерным распределением температуры по толщине конструкции без учета деформаций усадки бетона.

Температурное поле определяется, исходя из решения дифференциального уравнения теплопроводности [6]:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, Q – плотность внутренних источников тепловыделений, ρ – плотность материала, c – удельная теплоемкость, t – время.

При наличии конвективного теплообмена с окружающей средой (на верхней и боковых поверхностях фундамента) граничные условия записываются в виде:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} + h \cdot (T - T_{\infty}) = 0, \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности, h – коэффициент теплоотдачи, T_{∞} – температура среды.

Фундаментная плита моделируется совместно с грунтовым массивом. Температура грунта на достаточном удалении от фундаментной плиты принимается постоянной и заданной.

Поскольку, за исключением краев фундаментной плиты, распределение температуры по сечению носит одномерный характер, то для определения функции $T(z, t)$ можно вместо уравнения (1) воспользоваться уравнением:

$$\lambda(z, t) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3)$$

Поскольку ГОСТ 25192 не предусматривает классификацию бетонов по величине тепловыделения, для оценки мощности внутреннего источника тепла (тепловыделения бетона) принят следующий подход. Согласно [7], тепловыделение цемента во времени зависит от его минералогического состава и кинетики процесса, и может быть представлено функцией:

$$Q_{\tau} = f_1(\tau) \cdot a \cdot C_3S + f_2(\tau) \cdot b \cdot C_2S + f_3(\tau) \cdot c \cdot C_3A + f_4(\tau) \cdot d \cdot C_4AF + f_5(\tau) \cdot e \cdot SO_3, \quad (4)$$

где:

C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , SO_3 – содержание основных клинкерных минералов и гипсового камня в пересчете на SO_3 , %;

a , b , c , d , e – удельное тепловыделение минералов и гипсового камня, КДж/кг;

$f_1(\tau) \dots f_5(\tau)$ – функции, описывающие кинетику тепловыделения [7], показывающие хорошую корреляцию расчетных и фактических значений.

Согласно ГОСТ 23464 цементы классифицируются на низкотермичные с величиной тепловыделения не более 230 (270) КДж/кг соответственно в 3 и 7 сут. и умереннотермичные с величиной тепловыделения не более 315 КДж/кг в 7 сут. Для численного эксперимента был принят цемент с величиной тепловыделения в 28 сут. 470 КДж/кг, в 3 сут. 170 и 270 соответственно для медленно и быстротвердеющего, хотя по данным по 33 партиям цемента за 6 лет о химико-минералогическом составе клинкеров и цементов, применяемых на одном из предприятий по производству товарных бетонных смесей, получены значения тепловыделения цементов от 343 до 447 КДж/кг в возрасте 3 сут., а в 7 сут. от 411 до 517 КДж/кг, т.е. указанные цементы не являются умереннотермичными, поэтому результаты, полученные при моделировании можно рассматривать, как нижнюю границу из возможных вариантов.

При реализации численного эксперимента для расчета кинетики тепловыделения бетона в температурно-усадочном блоке согласно СТО НОСТРОЙ 2.6.208-2016 использована зависимость:

$$Q_{\tau} = Q_{28} \cdot \exp \left(k \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{\tau} \right)^x \right) \right). \quad (5)$$

Количественные значения входящих в ф. (5) величин при $\tau > 0,5$ сут. приведены в табл. 1.

Количественные значения входящих в ф. (5) для бетонов классов

Темп твердения	Параметры в формуле		
	Q_{28}	k	x
Быстро R	130/190*	0,15/0,14	0,47/0,5
Медленно S	130/190	0,26/0,28	0,7/0,73

Примечание: * - в числителе В25, в знаменателе В45

На рис. 1 представлены данные о кинетике тепловыделения исследованных бетонов в интересующий нас ранний период до 7 сут.

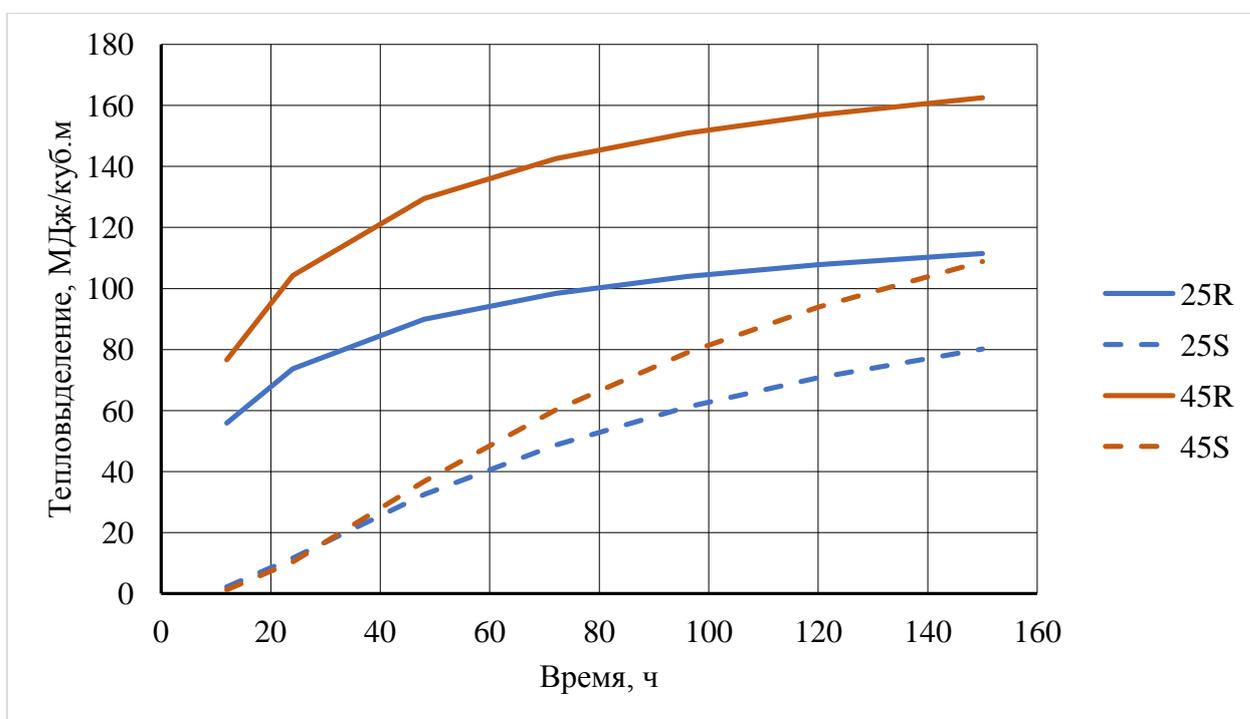


Рис. 1. - Зависимость тепловыделения бетона от времени в ранний период твердения

25R; 25S; 45R; 45S – соответственно бетон класса В25, В45 быстро и медленнотвердеющий

При моделировании напряженно-деформированного состояния, зависимость прочностных и деформативных характеристик бетона от времени принята в соответствии со следующими положениями:

- предел прочности бетона на сжатие представлен, как функция зрелости бетона $T \cdot t$, град·ч согласно Р НОСТРОЙ 2.6.17-2016 в виде [8]

$$R_b = R_{28} \cdot \exp\left(0,35 \cdot \left(1 - \left(\frac{15800 - 122,5 \cdot \bar{T}}{\bar{T} \cdot t}\right)^{0,55}\right)\right), \quad (6)$$

где R_{28} - соответственно 37 и 57 МПа для бетонов классов В25 и В45.

В табл. 2 и 3 представлены значения степени зрелости бетона ЗБ, полученные в результате численного эксперимента, и значения предела прочности бетона на сжатие по ф. (6).

Таблица №2

Значения показателей степени зрелости и предела прочности для бетонов класса В25

Показатели	Время, ч					
	12	24	48	72	96	120
ЗБ, °С·ч ¹ , верх ²	99*	427	1066	1682	2280	2866
	79*	326	866	1442	2033	2626
R верх, МПа, ²	0,3	5,5	13,5	18,2	21,4	23,8
	0,15	3,57	11,0	16,2	19,9	22,6
ЗБ, °С·ч ¹ , низ ³	298	677	1505	2376	3271	4178
	222	480	1080	1774	2542	3362
R низ, МПа, ³	3,3	9,3	17,6	22,6	26,0	28,5
	1,8	6,0	13,2	18,6	22,6	25,7

Примечания: 1 – зрелость бетона; * - верхняя строка – быстротвердеющий, нижняя строка – медленно твердеющий; 2 – верх плиты; 3 – низ плиты

Таблица №3

Значения показателей степени зрелости и предела прочности для бетонов
класса В45

Показатели	Время, ч					
	12	24	48	72	96	120
ЗБ, °С·ч ¹ , верх ²	103*	470	1214	1927	2614	3276
	80*	325	867	1466	2090	2724
R верх, МПа, ²	0,6	10,0	23,5	30,9	35,8	39,3
	0,2	5,4	17,0	25,3	31,2	35,6
ЗБ, °С·ч ¹ , низ ³	322	775	1814	2942	4121	5326
	221	475	1082	1819	2664	3593
R низ, МПа, ³	5,9	16,9	31,2	39,6	45,0	48,8
	2,8	9,1	20,4	29,2	35,8	40,8

Примечания: 1 – зрелость бетона; * - верхняя строка – быстротвердеющий, нижняя строка – медленно твердеющий; 2 – верх плиты; 3 – низ плиты

Значения начального модуля упругости бетона E_0 для расчета температурных напряжений приняты как функция предела прочности на сжатие R_b , инвариантная ко времени:

$$E_0 = 1000 \cdot \frac{0,05 \cdot R_b + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + R_b}} \quad (7)$$

Напряжения в бетоне определялись на основе гипотезы плоских сечений. Приращение напряжений на каждом шаге по времени вычислялось по формуле:

$$\Delta\sigma(z) = \frac{E_0(z, t)}{1 - \nu} \cdot (\Delta\varepsilon - \alpha \cdot \Delta T(z) - \Delta\varepsilon_{cr}(z)), \quad (8)$$

где $\Delta\varepsilon$ – среднее по толщине плиты приращение полной деформации, $\Delta T(z)$ – разница между температурой в точке на текущем и предыдущем шаге по времени, $\Delta\varepsilon_{cr}(z)$ – приращение деформации ползучести, ν – коэффициент Пуассона бетона. Множитель $(1 - \nu)$ в знаменателе в формуле (8) учитывает работу бетона в условиях двухосного растяжения (сжатия) ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$).

Величина $\Delta\varepsilon$ определялась по формуле:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\int_0^h E_0(z) \cdot (\alpha \cdot \Delta T(z) + \Delta\varepsilon_{cr}(z)) dz}{\int_0^h E_0(z) dz}, \quad (9)$$

где h - толщина фундаментной плиты.

Для определения деформаций ползучести использовалась линейная теория наследственности:

$$\varepsilon_{cr}(t) = -(1 - \nu) \cdot \int_0^t \sigma(\tau) \cdot \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (10)$$

Множитель $(1 - \nu)$ здесь также учитывает работу бетона в условиях двухосного напряженного состояния. Мера ползучести задавалась в виде:

$$C(t, \tau) = \frac{\varphi(\tau)}{E_0(t)} \cdot (1 - e^{-\gamma(t-\tau)}). \quad (11)$$

где: $E_0(t)$ – модуль упругости бетона, МПа;

- коэффициент γ определяет скорость ползучести, принимался равным $0,05 \text{ сут}^{-1}$;

- $\varphi(\tau)$ – предельное (при $t \rightarrow \infty$) значение коэффициента ползучести при нагружении бетона в возрасте τ :

$$\varphi(\tau) = \frac{8000}{(E_0(\tau))^{0,785}}. \quad (12)$$

При расчете уровня растягивающих напряжений предел прочности бетона на растяжение принимался как функция предела прочности на сжатие, инвариантная ко времени:

$$R_{bt} = 0,29 \cdot R_b^{0,6}. \quad (13)$$

Для моделирования температурных полей и напряжений согласно СТО НОСТРОЙ 2.6.208-2016 принят температурно-усадочный блок фундаментной плиты размером $20 \times 20 \times 2$ (h) м с модулем поверхности $1,2 \text{ м}^{-1}$. Укладка бетонной смеси предусмотрена послойная с толщиной слоев $0,4$ м с интервалом от 2 ч (непрерывное бетонирование) до 24 ч (с устройством

рабочего шва) [9]. Температура среды принята от 5 °С до 35 °С, температура бетонной смеси в момент укладки при температуре среды 5 °С принята 10 °С, при температуре среды 35 °С – 25 °С. Коэффициент теплоотдачи принят от 23 до 1 Вт/м²·°С. При устройстве рабочего шва предусматривалась в соответствии с планом численного эксперимента варьирование коэффициентом теплоотдачи. Численный эксперимент реализован с использованием плана На-5 (Хартли-5) [10]. Факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 4.

Таблица №4

Факторы и уровни варьирования при реализации численного эксперимента

Уровни	Факторы				
	Перерыв между укладкой слоев, τ , ч	Температура среды, T , °С	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·°С α	Кинетика твердения бетона (уравнение тепловыделения)	Класс бетона
	X1	X2	X3	X4	X5
Верхний	2	5	23	R	B25
Средний	13	20	12	M	B35
Нижний	24	35	1	S	B45

На рис. 2 представлены расчетные по результатам численного эксперимента значения уровня растягивающих напряжений для быстротвердеющих бетонов классов B25 ... B45 при максимальной теплоотдаче с поверхности (неутепленная поверхность).

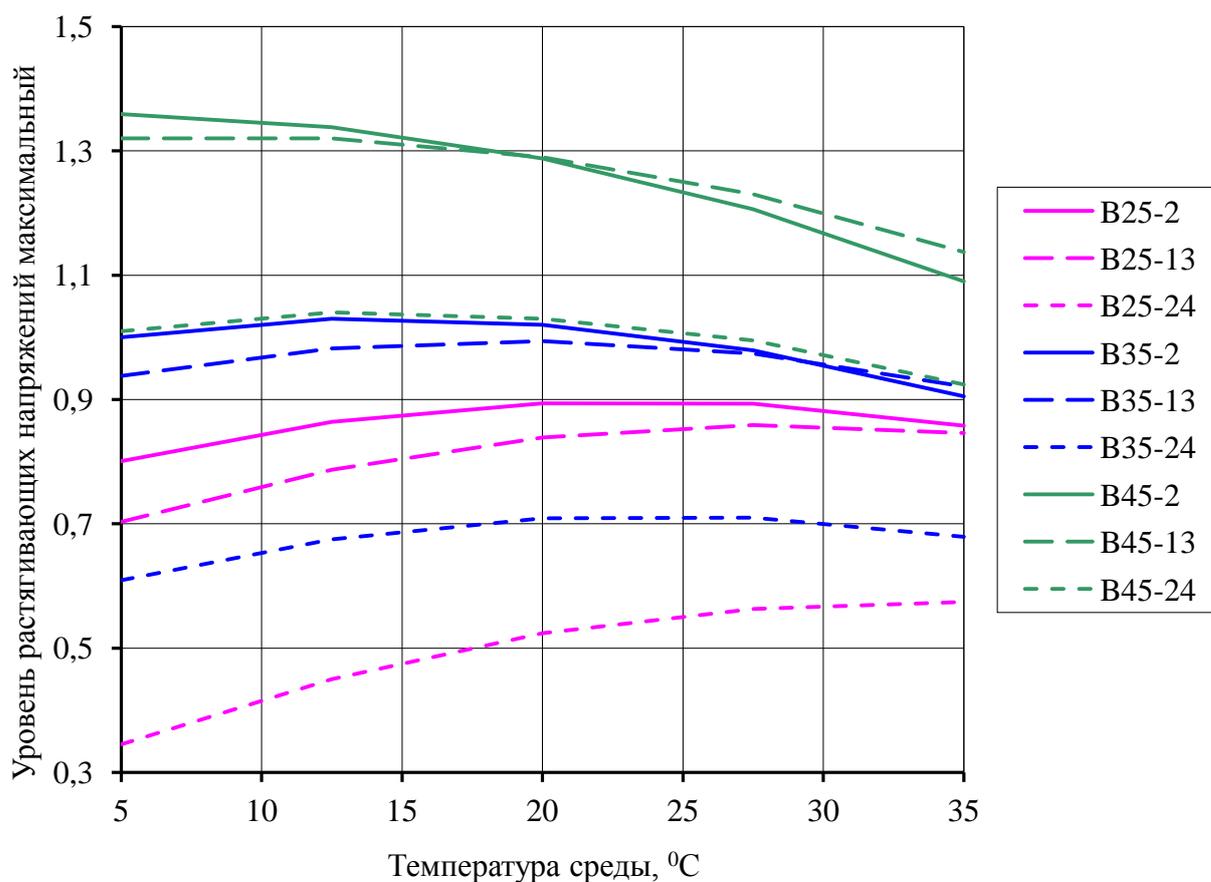


Рис. 2. - Зависимость уровня растягивающих напряжений от температуры среды, класса бетона, интенсивности бетонирования
B25 ... B45 – класса бетона; 2, 13, 24 – перерыв между укладкой слоев, ч

На рис. 3 представлены расчетные по результатам численного эксперимента значения уровня растягивающих напряжений для медленнотвердеющих бетонов классов B25 ... B45 при минимальной теплоотдаче с поверхности (утепленная поверхность).

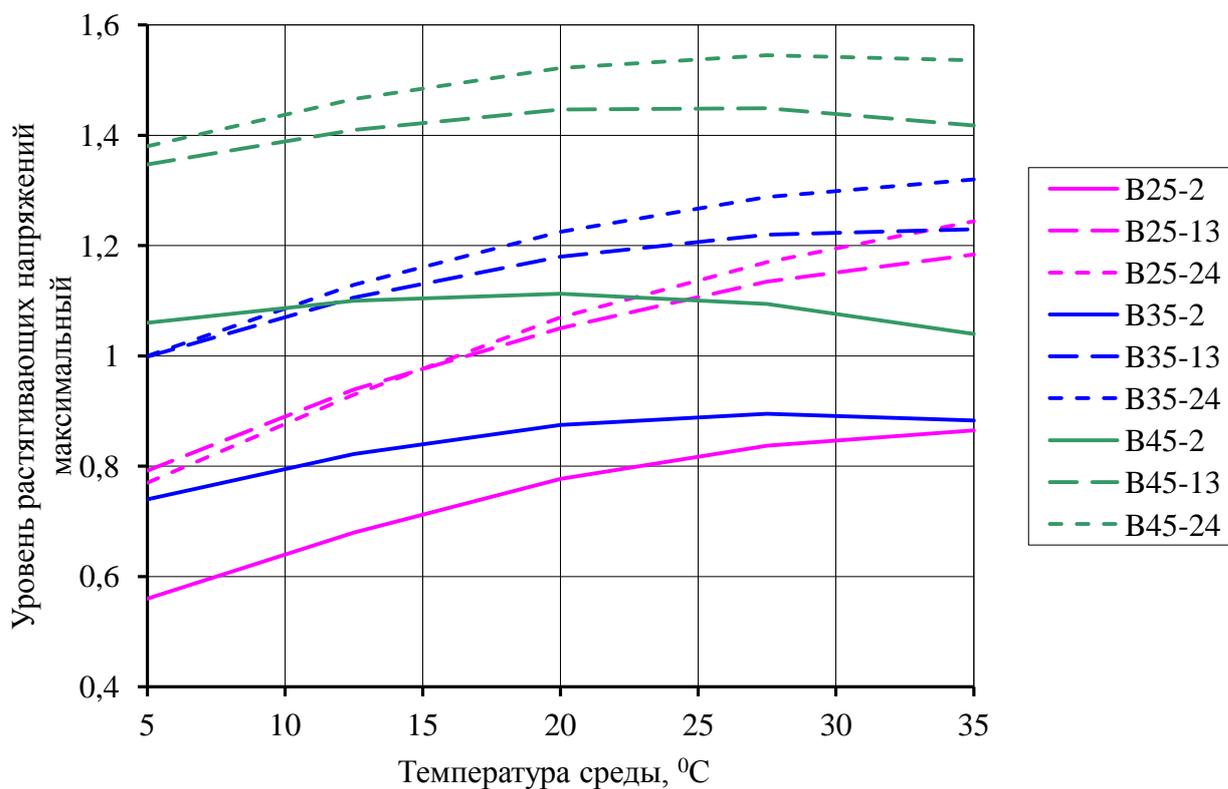


Рис. 3. - Зависимость уровня растягивающих напряжений от температуры среды, класса бетона, интенсивности бетонирования

B25 ... B45 – класса бетона; 2, 13, 24 – перерыв между укладкой слоев, ч

Из представленных на рис. 2 и 3 данных следует:

- уровень растягивающих напряжений в ранний период твердения массивной монолитной железобетонной конструкции возрастает с ростом класса применяемого бетона, что не противоречит некоторым известным данным [11-13];

- характер изменения уровня напряжений зависит от кинетики твердения бетона и коэффициента теплоотдачи, в частности, для медленнотвердеющих бетонов при минимальной теплоотдаче с поверхности минимальный уровень напряжений характерен при непрерывном бетонировании (перерыв между укладкой слоев 2 ч), при этом с увеличением продолжительности перерыва между укладкой слоев соответственно до 13 и

24 ч различие в уровне напряжений незначительно (рис. 3), тогда как для быстротвердеющих бетонов при максимальной теплоотдаче с поверхности минимальный уровень напряжений характерен при бетонировании с рабочими швами (перерыв между укладкой слоев 24 ч), а различие в уровне напряжений при продолжительности перерыва от 2 до 13 ч также незначительно (рис. 2).

На рис. 4 представлена расчетная зависимость напряжений (σ , со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты, изготовленной из бетона класса В25 в ранний период твердения (до 7 сут.) при температуре среды 20 °С, непрерывном бетонировании и максимальной теплоотдаче. Здесь же представлены данные о расчетном пределе прочности бетона на растяжение R_t , полученном по ф. (6) и ф. (8).

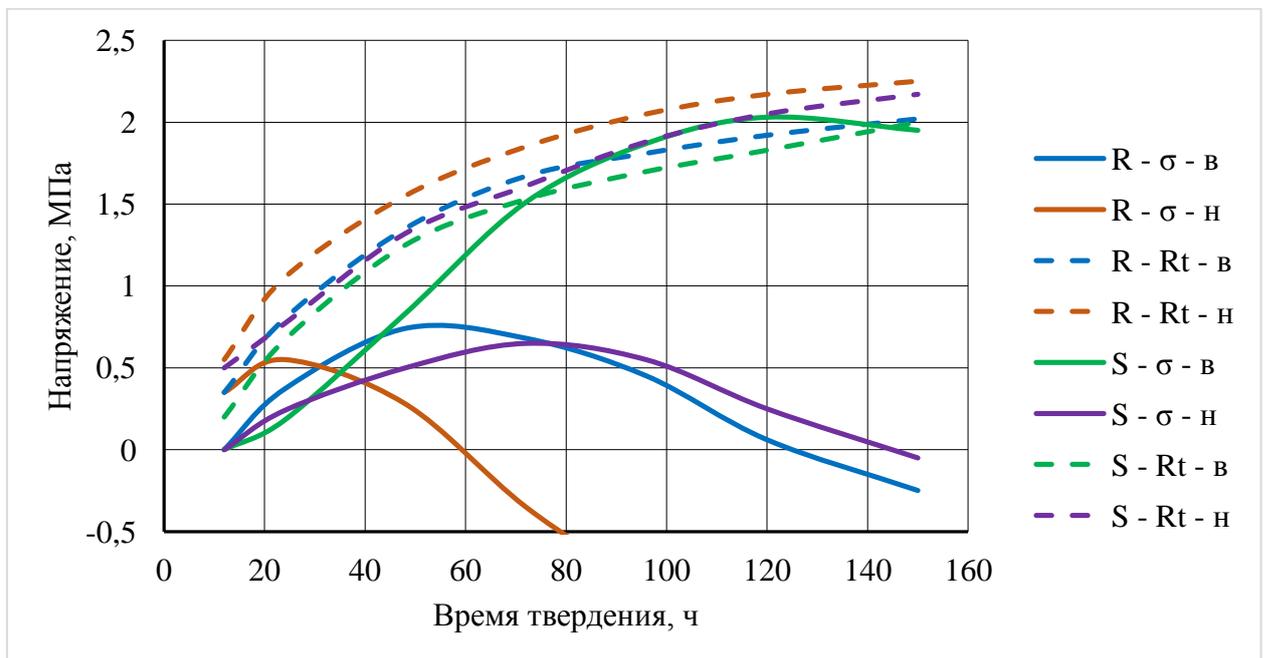


Рис. 4. - Расчетная зависимость напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты из бетона класса В25
R, S – соответственно бетон быстро и медленно твердеющий;
в, н – соответственно верхняя и нижняя грань плиты

Из представленных на рис. 4 данных очевидно, что характер напряжений, в т.ч. знак напряжений, существенно зависит от их координат (верхняя или нижняя грань), что обусловлено принципиальным различием характера теплообмена с окружающей средой и основанием, и кинетикой твердения бетона (быстро или медленно твердеющий).

На рис. 5 представлена расчетная зависимость уровня напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) в ранний период твердения (до 7 сут.) для верхней и нижней грани плиты, изготовленной из бетона класса В25 в ранний период твердения (до 7 сут.) при температуре среды 20 °С, непрерывном бетонировании и максимальной теплоотдаче.

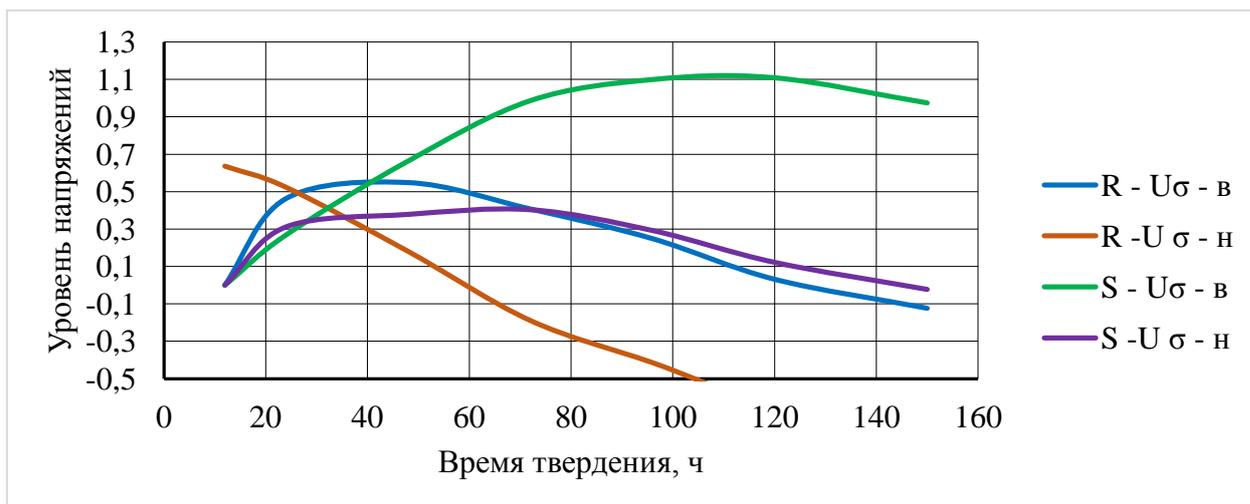


Рис. 5. - Расчетная зависимость уровня напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты из бетона класса В25
R, S – соответственно бетон быстро и медленно твердеющий;
в, н – соответственно верхняя и нижняя грань плиты

Из представленных на рис. 5 данных очевидно, что для медленно твердеющего бетона класса В25 при максимальной теплоотдаче с верхней грани плиты возникает существенный риск раннего трещинообразования в период 3 – 5 сутки твердения. Для

быстротвердеющего бетона в этой же точке максимальный уровень растягивающих напряжений достигается к возрасту 1,5 – 2 сут., но при этом риск раннего трещинообразования вдвое ниже относительно медленнотвердеющего бетона.

На рис. 6 представлена расчетная зависимость напряжений (σ , со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты, изготовленной из бетона класса В45 в ранний период твердения (до 7 сут.) при температуре среды 20 °С, непрерывном бетонировании и максимальной теплоотдаче. Здесь же представлены данные о расчетном пределе прочности бетона на растяжение R_t , полученном по ф. (6) и ф. (8).

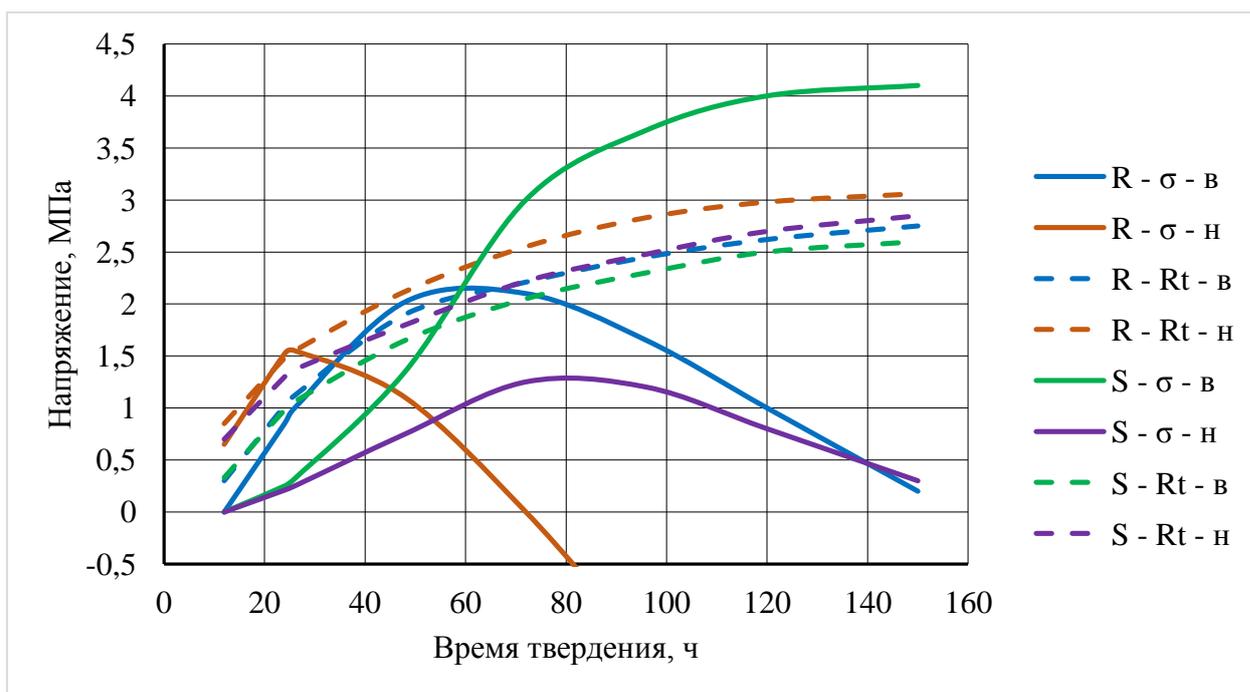


Рис. 6. - Расчетная зависимость напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты из бетона класса В45
R, S – соответственно бетон быстро и медленнотвердеющий;
в, н – соответственно, верхняя и нижняя грань плиты

Из представленных на рис. 6 данных, очевидно, что для бетона класса В45, так же, как и для бетона класса В25, характер напряжений, в т.ч. знак напряжений, существенно зависит от их координат (верхняя или нижняя грань), что обусловлено принципиальным различием характера теплообмена с окружающей средой и основанием, и кинетикой твердения бетона (быстро или медленно твердеющий).

На рис. 7 представлена расчетная зависимость уровня напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) в ранний период твердения (до 7 сут.) для верхней и нижней грани плиты, изготовленной из бетона класса В45 в ранний период твердения (до 7 сут.) при температуре среды 20 °С, непрерывном бетонировании и максимальной теплоотдаче.

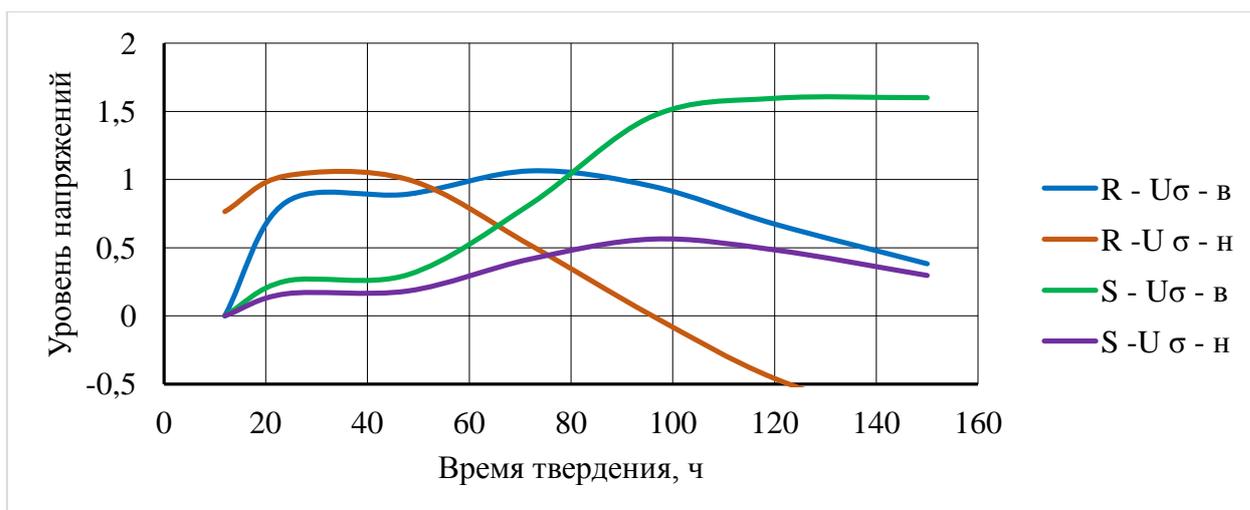


Рис. 7. - Расчетная зависимость уровня напряжений (со знаком «плюс» - растягивающие) для верхней и нижней грани плиты из бетона класса В45

R, S – соответственно бетон быстро и медленно твердеющий;

в, н – соответственно верхняя и нижняя грань плиты

Из представленных на рис. 7 данных, очевидно, что для бетона класса В45 высок риск раннего трещинообразования при рассматриваемых параметрах бетонирования практически независимо от координат,

исключение составляет нижняя грань для медленно твердеющего бетона, в связи с этим очевидно, что для рассматриваемых параметров бетонирования применение более высокопрочного относительно В25 бетона нецелесообразно. Очевидно, что при разработке технологических регламентов бетонирования определение технологических параметров (интенсивность укладки смеси, термическое сопротивление опалубки, устройство рабочих швов и др.) невозможно без учета кинетики твердения бетона, определяемой рецептурными особенностями бетонных смесей.

Заключение

Обоснована возможность применения при расчете температурных полей записи дифференциального уравнения теплопроводности для одномерной задачи вследствие однородного характера распределения температуры, за исключением краев, по сечению в температурно-усадочных блоках массивных фундаментных плит. Предложена зависимость и обоснованы численные значения параметров для расчета кинетики тепловыделения бетона в температурно-усадочном блоке. Доказана целесообразность и приведены соответствующие зависимости для определения значений прочностных и деформативных свойств бетона во времени по значению показателя «зрелость бетона» при расчете уровня температурных напряжений. Показана роль рецептурных факторов в принятии рациональных технологических решений.

Литература

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургатов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса "Федерация" // Промышленное и гражданское строительство, №8, 2006. - С. 20-22
2. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А. Высокопрочные бетоны повышенной жизнеспособности для конструкций фундаментов МФК «Ахмат-Тауэр» // Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса, 2017. – С. 875-883
3. Fairbairn E.M.R., Silvos M.M., Filho R.D.T., Alves J.L.D., Ebecken N.F.F. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms // Computers & structures, №8, 2004. - pp. 281-299
4. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплого экрана реактора АЭС // Инженерный вестник Дона, 2015, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421
5. Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык, Брянский И.А., Дам Хыу Хын Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов // Вестник МГСУ, №13 (11), 2018. - С. 1407–1418
6. Semenov K., Kukolev M., Zaichenko N., Popkov S., Makeeva A., Amelina A., Amelin P. Unsteady temperature fields in the calculation of crack resistance of massive foundation slab during the building period // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. Springer, Cham, 2019. - pp. 455-467

7. Несветаев Г.В., Та Ван Фан Тепловыделение при гидратации и предел прочности цементного камня // Интернет-журнал «Науковедение», №3, 2013
URL: naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf

8. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона // Инженерный вестник Дона, 2021, №10 (82) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228

9. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Технология и качество бетонных работ: учебное пособие. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 228 с.

10. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. - М.: Статистика, 1981. – 263 с.

11. Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures – State of the art, FA 3 Technical performance, SP 3.1 Crack free concrete structures. - COIN Project report no 31 – 2011. – 142 p.

12. Bofang Zhu Thermal stresses and temperature control of mass concrete. - Kidlington, Oxford; Waltham, Mass.: Butterworth-Heinemann, 2014. - 500 p.

13. Kuriakose B., Rao B.N., Dodagoudar G.R. Early-age temperature distribution in a massive concrete foundation // Procedia Technology, №25, 2016. – pp. 107-114

References

1. Kaprielov S.S., Shejnfel`d A.V., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V., Kardumyan G.S., Urgapov V.I. Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo, №8, 2006. pp. 20-22

2. Murtazaev S.A.Yu., Sajdumov M.S., Alasxanov A.X., Murtazaeva T.S.A. Fundamental`ny`e osnovy` stroitel`nogo materialovedeniya. Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo oglajn-kongressa, 2017. pp. 875-883.
3. Fairbairn E.M.R., Silvos M.M., Filho R.D.T., Alves J.L.D., Ebecken N.F.F. Computers & structures, №8, 2004. pp. 281-299.
4. Agaxanov E`.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Kulinich I.I. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421
5. Aniskin N.A., Nguen Chong Chy`k, Bryanskij I.A., Dam Xy`u Xy`n Vestnik MGSU, №13 (11), 2018. pp. 1407-1418.
6. Semenov K., Kukolev M., Zaichenko N., Popkov S., Makeeva A., Amelina A., Amelin P. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering. Springer, Cham, 2019. pp. 455-467.
7. Nesvetaev G.V., Ta Van Fan Internet-zhurnal «Naukovedenie», №3, 2013 URL: naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf
8. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Suxin D.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228
9. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Tekhnologiya i kachestvo betonny`x robot [Technology and quality of concrete works]: uchebnoe posobie. Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022. 228 p.
10. Voznesenskij V.A. Statisticheskie metody` planirovaniya e`ksperimenta v texniko-e`konomicheskix issledovaniyax [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies]. M.: Statistika, 1981. 263 p.
11. Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures. State of the art, FA 3 Technical performance, SP 3.1 Crack free concrete structures. COIN Project report no 31. 2011. 142 p.



12. Bofang Zhu Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Kidlington, Oxford; Waltham, Mass.: Butterworth-Heinemann, 2014. 500 p.
13. Kuriakose B., Rao B.N., Dodagoudar G.R. Procedia Technology, №25, 2016. pp. 107-114.