

Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит

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

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

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

Аннотация: Показана актуальность моделирования температурного режима и напряженно-деформированного состояния в ранний период возведения массивных монолитных железобетонных конструкций. Приведены некоторые данные о температурных и временных параметрах формирования температурных полей в конструкциях с модулем поверхности от менее 1,1 до 2,4 из бетонов классов от В25 до В70 как быстро, так и медленно твердеющих. Обоснованы по результатам обработки многочисленных данных количественные значения параметров кинетики тепловыделения для предложенной зависимости. Предложена упрощенная методика расчета температурных напряжений, основанная на предложенных и обоснованных зависимостях свойств бетона от его степени зрелости, которые подтверждены многочисленными экспериментальными данными, в т.ч. полученными другими исследователями. Проведено сравнение полученных расчетных значений напряжений при возведении температурно-усадочного блока 20х20х2 м из бетонов быстро и медленно твердеющих классов В25 и В45 с некоторыми экспериментальными результатами и данными моделирования. Сделан вывод о нецелесообразности применения бетонов класса В45 в связи с высоким риском трещинообразования в период 1,5 – 3 сут. При применении бетонов класса В25 предпочтение следует отдать быстротвердеющему.

Ключевые слова: массивные монолитные конструкции, температурные напряжения, трещинообразование, степень зрелости бетона, кинетика.

Бетонирование массивных монолитных железобетонных конструкций связано с риском раннего трещинообразования, обусловленного температурными и усадочными деформациями, особенно для бетонов высоких классов, в связи, с чем актуальной задачей является регулирование температурного режима выдерживания бетона. П. 5.4.2 СП 70.13330.2012 предписывает «в массивных монолитных конструкциях ... мероприятия по уменьшению влияния температурно-влажностных полей напряжений» и указывает, что «в бетоне в процессе твердения следует поддерживать расчетный температурно-влажностный режим». П. 10.11 СП 435.1325800.2018 указывает, что «скорость остывания бетона в массивных конструкциях не должна превышать значения, определяемого расчетом и обеспечивающего отсутствие трещин в поверхностных слоях бетона». П. 16.3

СТО НОСТРОЙ 2.6.54-2011 в качестве технологических мероприятий по регулированию температурного режима твердения рекомендует «подогрев периферийной части в период разогрева бетонного массива за счет экзотермии цемента (ориентировочно от 1,5 до 3,0 сут.) для выравнивания температурного градиента и поддержание скорости остывания бетона в конструкции не более 5 °С/ч после достижения его максимальной температуры». Согласно [1] для регулирования температурного режима выдерживания бетона при возведении массивных конструкций целесообразно сочетание рецептурных, в частности, применение низкотермичных цементов в сочетании с ограничением содержания цемента в бетонной смеси и введением добавок-замедлителей твердения и технологических факторов, например, регулирование теплопотерь, периферийный обогрев для выравнивания температурных градиентов [2,3]. Современная технология позволяет посредством управления рецептурными факторами обеспечивать необходимые технологические параметры в широком диапазоне в зависимости от температурных условий, особенностей возводимой конструкции и возможностей производителя работ. Многочисленные данные, некоторые из которых представлены в табл. 1, полученные как в результате обследования реальных конструкций, так и в результате моделирования температурного режима и напряженно-деформированного состояния в ранний период возведения массивных монолитных железобетонных конструкций свидетельствуют об актуальности проблемы.

Поскольку температурные градиенты являются одной из основных причин формирования напряжений, закономерно важной задачей является совершенствование алгоритма расчета температурных напряжений, включающего расчет температурных полей в ранний период возведения конструкции с учетом кинетики тепловыделения бетона, условий

теплообмена и температуры окружающей среды. В [4], в частности, установлено превышение величины напряжений предела прочности бетона на растяжение примерно через 3,5 сут. выдерживания. В [5] при исследованиях с использованием уникального оборудования зафиксировано для бетона с проектной прочностью 80 МПа превышение величины растягивающих напряжений (≈ 3 МПа) над пределом прочности на растяжение примерно после 54 ч выдерживания. В [6] для растягивающих напряжений на верхней поверхности плиты через 72 ч, что соответствовало максимуму температуры в центре плиты, получено значение величины растягивающих напряжений 2,43 МПа, что сопоставимо с пределом прочности на осевое растяжение бетона класса В25 в проектном возрасте.

Таблица №1

Некоторые данные о температурном режиме при возведении массивных железобетонных конструкций

№	Конструкция	Модуль, М ⁻¹	Бетон	Температура, °С			Время Тц/Тп max	Т среды
				смеси	конструкции			
					центр	поверхность		
Результаты измерения в конструкциях в 2016 – 2022 гг.								
1	4,5x4,5x2(h)	1,9	В25	-	47	-	29	12...30
2	16x9x2,5(h)	1,4	В30	16	69,5	38,7	54/62	4...15
3	16x9x2,5(h)	1,4	В30	29	71,1	54,3	26/34	21...34
4	12,2x11,1x3,5	1,4	В30	13...17	66,0	47,0	48/20	7...17
5	10,2x2,3x1,5	2,4	В45	24	56,0	49,0	37/37	14...27
6	33,7x5,2x2(h)	1,4	В45	8	58,6	40,2	39/37	11...18
7	28,7x4x2(h)	1,6	В45	15	56,4	40,0	32/36	8...13
8	32,0x16,0x1(h)	2,2	В30	18	44,6	36,8	24/40	11...20
По данным численного моделирования								
9*	D=52,0, h=2,0	<1,1	В35	-	$\approx 64,5$	$\approx 29,0$	$\approx 75/52$	$\approx 19...27$
10**	h=1,0		В70	-	≈ 62	-	$\approx 24/-$	-
11	h=2,0	-	Ц = 340 кг/м ³	-	63,8	28,2	72/48	-
12	h=1,4 h=1,5	-	В35R В40S	-	≈ 73 ≈ 48	-	$\approx 60/-$ $\approx 60/-$	-

Примечания: 9-12 – соответственно по данным [5-8]

Учитывая многочисленность рецептурных и технологических факторов, влияющих на формирование температурных полей при возведении массивных железобетонных конструкций, в настоящей работе на основании разработанной методики расчета температурных полей [9] произведено посредством реализации численного эксперимента моделирование на примере температурно-усадочного блока фундаментной плиты размером 20x20x2 (h) м с модулем поверхности 1,2 м⁻¹, влияния таких технологических факторов, как время перекрывания слоев от 2 ч до 24 ч, температуры среды 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 от 23 до 1 Вт/м²·°С, класса бетона по прочности на сжатие В25 – В45, кинетики твердения бетона – от быстро до медленнотвердеющего. Моделирование температурного режима температурно-усадочного блока выполнено совместно с грунтовым массивом, при этом температура грунта на достаточном удалении принята заданной и постоянной. Поскольку, за исключением краев фундаментной плиты, распределение температуры по сечению носит одномерный характер, то дифференциальное уравнение теплопроводности [10]:

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

с учетом граничных условий при конвективном теплообмене с окружающей средой на верхней и боковых поверхностях фундамента в виде:

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

для определения функции $T(z, t)$ сводится к виду:

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

где λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, Q – плотность внутренних источников тепловыделений, ρ – плотность материала, c –

удельная теплоемкость, t – время, n – нормаль к поверхности, h – коэффициент теплоотдачи, T_{∞} – температура среды.

При реализации численного эксперимента для расчета кинетики тепловыделения бетона в температурно-усадочном блоке использована зависимость:

$$Q_{\tau} = Q_{28} \cdot \exp\left(k \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^x\right)\right), \quad (4)$$

в которой значения параметров k и x получены в результате обработки представленных на рис. 1 данных о кинетике тепловыделения различных бетонов.

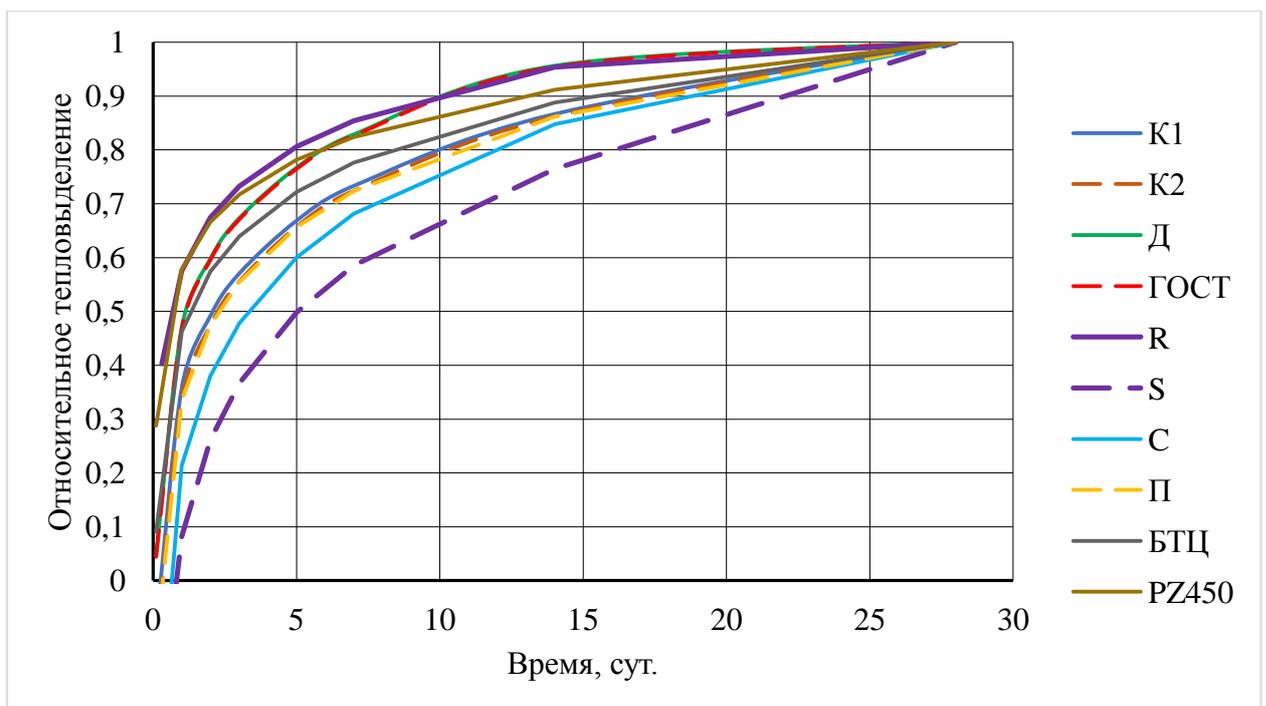


Рис. 1. - Относительное тепловыделение бетонов по данным:

K1, K2 – Кардумян Г.С., Д – Добрецова [4], ГОСТ – ГОСТ 24314, прил. 3; R, S – зависимости, принятые для моделирования в настоящей работе для быстро (R) и медленнотвердеющего (S) бетона, С – [11]; П – [12], БТЦ – по данным Кравченко И.В., PZ-450 – по данным Люр Х.П., Эфес Я. [13]

На рис. 2 представлены данные об изменении температуры в центре некоторых представленных в табл. 1 конструкций и результаты моделирования по методике авторов для быстро и медленно твердеющих бетонов классов В25 и В45. Представленные данные свидетельствуют о весьма значительном влиянии, помимо массивности конструкции, таких факторов, как класс бетона (т.е. содержание цемента и, следовательно, итоговое количество выделяемого в процессе гидратации тепла) и кинетика твердения бетона (т.е. интенсивность тепловыделения). Многочисленность факторов и значительное их влияние на формирование температурных полей предопределяет актуальность моделирования при исследовании влияния рецептурно-технологических факторов на температурные поля и напряжения при возведении конструкций.

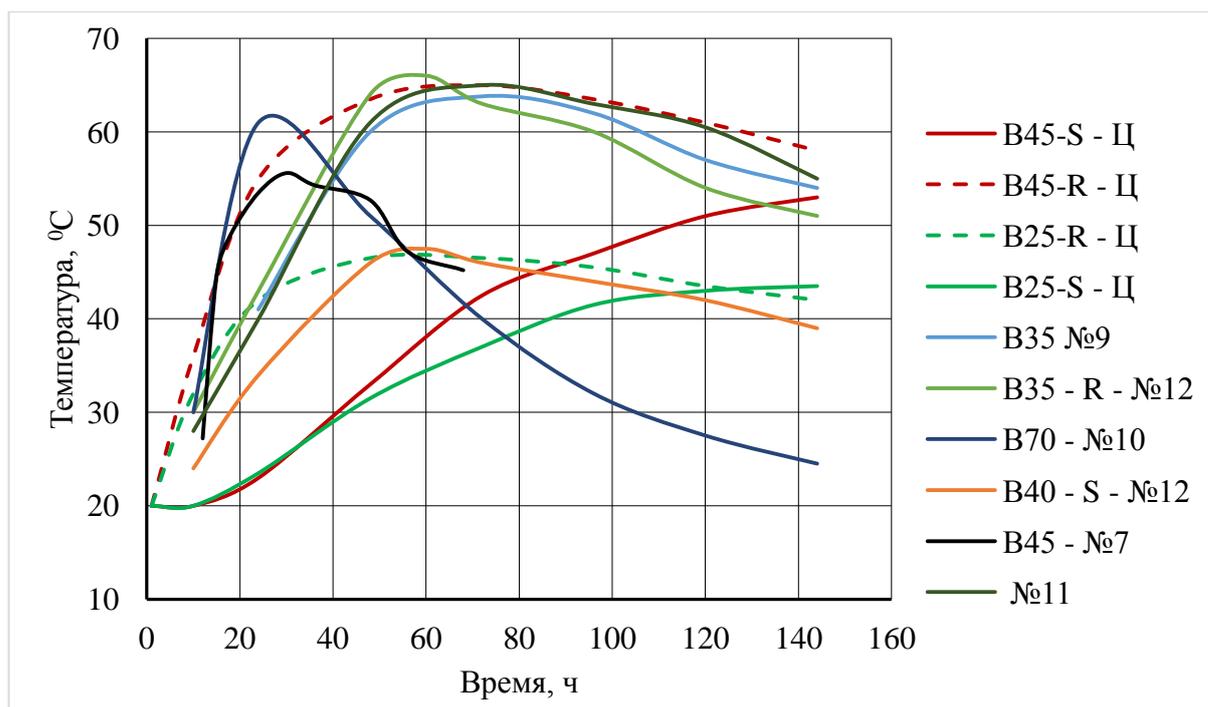


Рис. 2. - Изменение температуры в центре конструкций по табл. 1
B45-S – Ц, B45-R – Ц, B25-S – Ц, B25-R – Ц, B35 №9, B35 – R - №12,
B70 – №10, B40 – S – №12, B45 – №7, №11 – номера по табл. 1; B45 (25) –
класс бетона; S, R - соответственно медленно и быстротвердеющий бетон

Поскольку причиной раннего трещинообразования массивных монолитных конструкций являются возникающие вследствие температурных градиентов напряжения, актуальной задачей является оценка их величины в зависимости от рецептурно-технологических факторов. В работе сопоставляются результаты моделирования температурных напряжений на основе методики [14] и по методике, разработанной авторами. Согласно [14]:

$$\sigma_T = \frac{k_r \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1 + \varphi)}. \quad (5)$$

В расчетах значения входящих в ф. (5) величин приняты в зависимости от степени зрелости бетона $T\tau$ [1]:

σ_T - напряжение при растяжении, возникающее вследствие температурных градиентов, МПа;

k_r - степень ограничения на верхней поверхности плиты (0,83 [15]);

E - модуль упругости бетона, МПа;

α - коэффициент линейного температурного расширения бетона, принят с некоторым допущением постоянным и равным $1 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$;

ΔT - перепад температуры между центром и верхней поверхностью плиты в момент времени τ , $^\circ\text{C}$;

φ - коэффициент ползучести бетона.

Модуль упругости бетона, МПа, соответствующий степени зрелости бетона $T\tau$ рассчитывался по формуле [1]:

$$E = 1000 \cdot \frac{0,05 \cdot R_{pr,\tau} + 57}{1 + \frac{29}{3,8 + R_{pr,\tau}}}, \quad (6)$$

где $R_{pr,\tau}$ – призмная прочность бетона, соответствующая степени зрелости бетона $T\tau$, определялась по формуле [1]:

$$\frac{R_{pr,\tau}}{R_{pr,28}} = \exp \left(0,35 \cdot \left(1 - \left(\frac{15800 - 122,5 \cdot T}{T \cdot \tau} \right)^{0,55} \right) \right). \quad (7)$$

Коэффициент ползучести бетона рассчитывался по формуле [1]:

$$\varphi = \frac{8000}{E^{0,785}}. \quad (8)$$

В основе методики авторов лежат уравнения:

$$\Delta\sigma = E \cdot (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_f), \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\int_0^h E(z) \cdot \Delta\varepsilon_f(z) dz + (1-\nu) \cdot \sum E_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta T_{s,i} \cdot A_{s,i}}{\int_0^h E(z) dz + (1-\nu) \cdot \sum E_s \cdot A_{s,i}}, \quad (10)$$

где $\Delta\sigma$ – приращение напряжения на шаге по времени, $\Delta\varepsilon$ – приращение полной деформации, $\Delta\varepsilon_f = \alpha\Delta T + \Delta\varepsilon_{cr} + \Delta\varepsilon_{sh}$ – приращение вынужденной деформации, которая складывается из температурной деформации, деформации ползучести и усадки, E_s – модуль упругости арматуры, α_s – коэффициент температурного расширения арматуры, $\Delta T_{s,i}$ – разница между температурой арматуры i – го слоя на текущем и предыдущем шаге, $A_{s,i}$ – площадь поперечного сечения арматуры i – го слоя, с учетом ф. (6-8).

Достоверность разработанной методики расчета, достаточную для исследования влияния рецептурно-технологических факторов на характер напряжений при возведении массивных монолитных конструкций, иллюстрирует рис. 3. Сопоставление значений напряжений, полученных без учета и с учетом усадочных деформаций с экспериментальными показывает актуальность исследований в области получения количественных показателей кинетики контракционной усадки (autogenous shrinkage) в зависимости от рецептурно-технологических факторов.

При расчете предела прочности на осевое растяжение использован следующий алгоритм:

- по величине показателя степени зрелости бетона $T\tau$ по ф. (3) определяется предел кубиковой прочности бетона на сжатие R ($R = 0,8R_{pr}$);
- предел прочности бетона на осевое растяжение R_t определяется по формуле:

$$R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}. \quad (11)$$

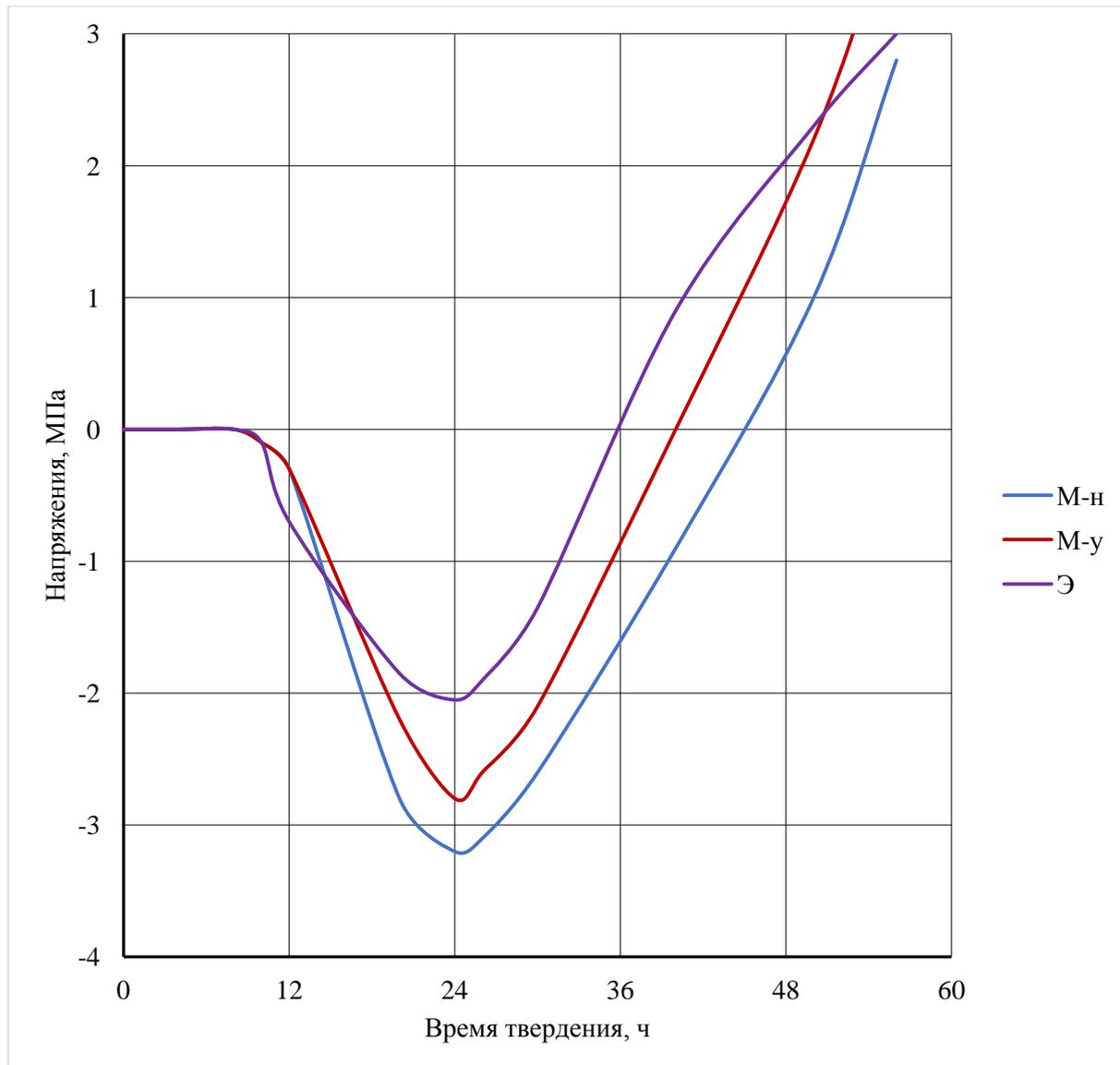


Рис. 3. - Расчетные и экспериментальные напряжения в монолитной стене толщиной 1 м из бетона с пределом прочности 80 МПа

М-н, М-у – расчетные значения соответственно без учета и с учетом контракционной усадки; Э – экспериментальные данные [5]

Достоверность алгоритма подтверждает, например, сопоставление экспериментальных значений для конструкции толщиной 1 м из бетона с пределом прочности на сжатие 80 МПа [5] с расчетными (рис. 4).

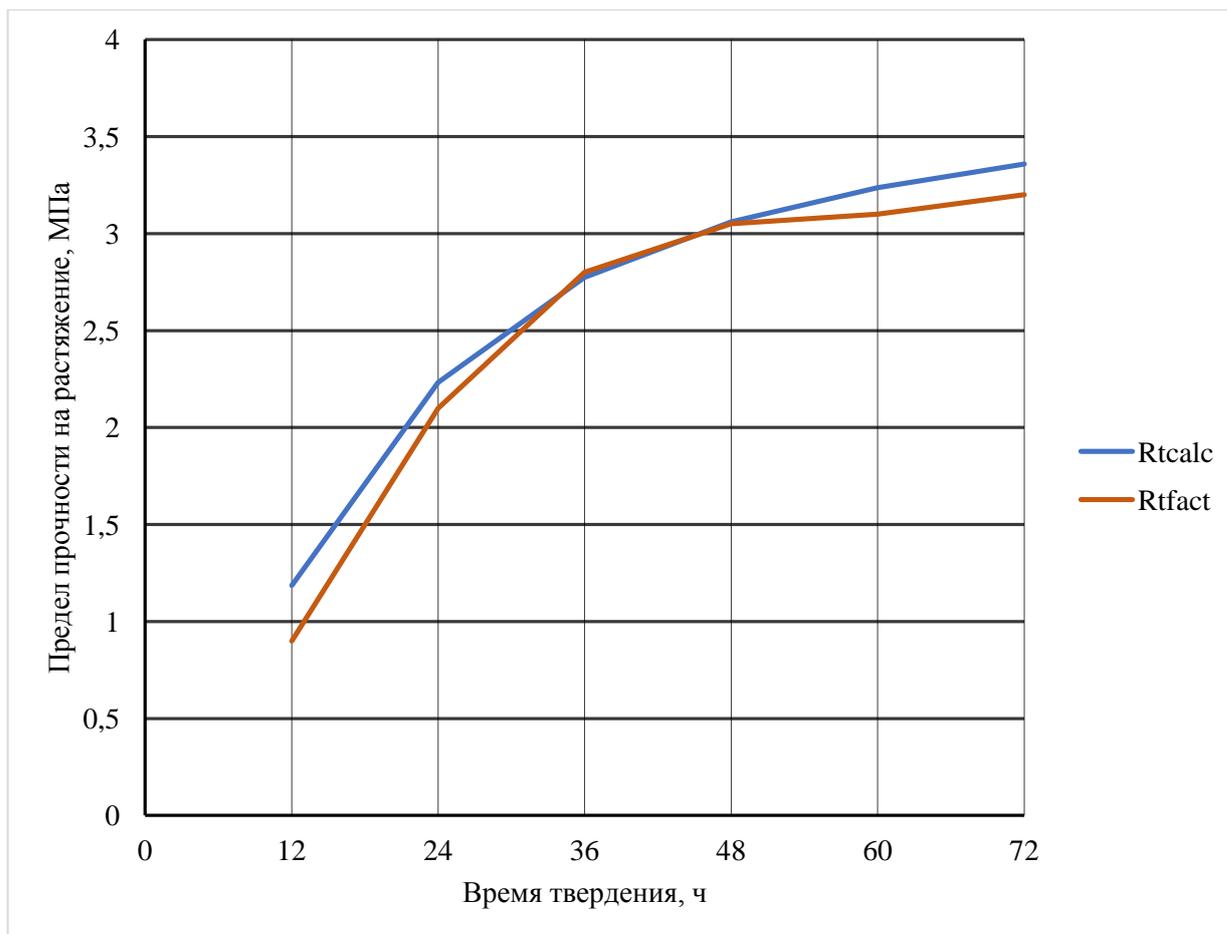


Рис. 4. - Сопоставление расчетных и экспериментальных значений предела прочности бетона на осевое растяжение

R_{tcalc} , R_{tfact} – соответственно расчетные по ф. (3, 11) и экспериментальные значения [5]

На рис. 5 представлены расчетные значения растягивающих напряжений по различным методикам для бетонов класса В45 с различной кинетикой твердения. Из представленных на рис. 5 данных очевидно, что, независимо от методики расчета напряжений в период от примерно 1,5 сут. до 3,5 сут. значения температурных растягивающих напряжений превышают предел прочности бетона на осевое растяжение в указанный момент времени, что можно рассматривать как причину трещинообразования.

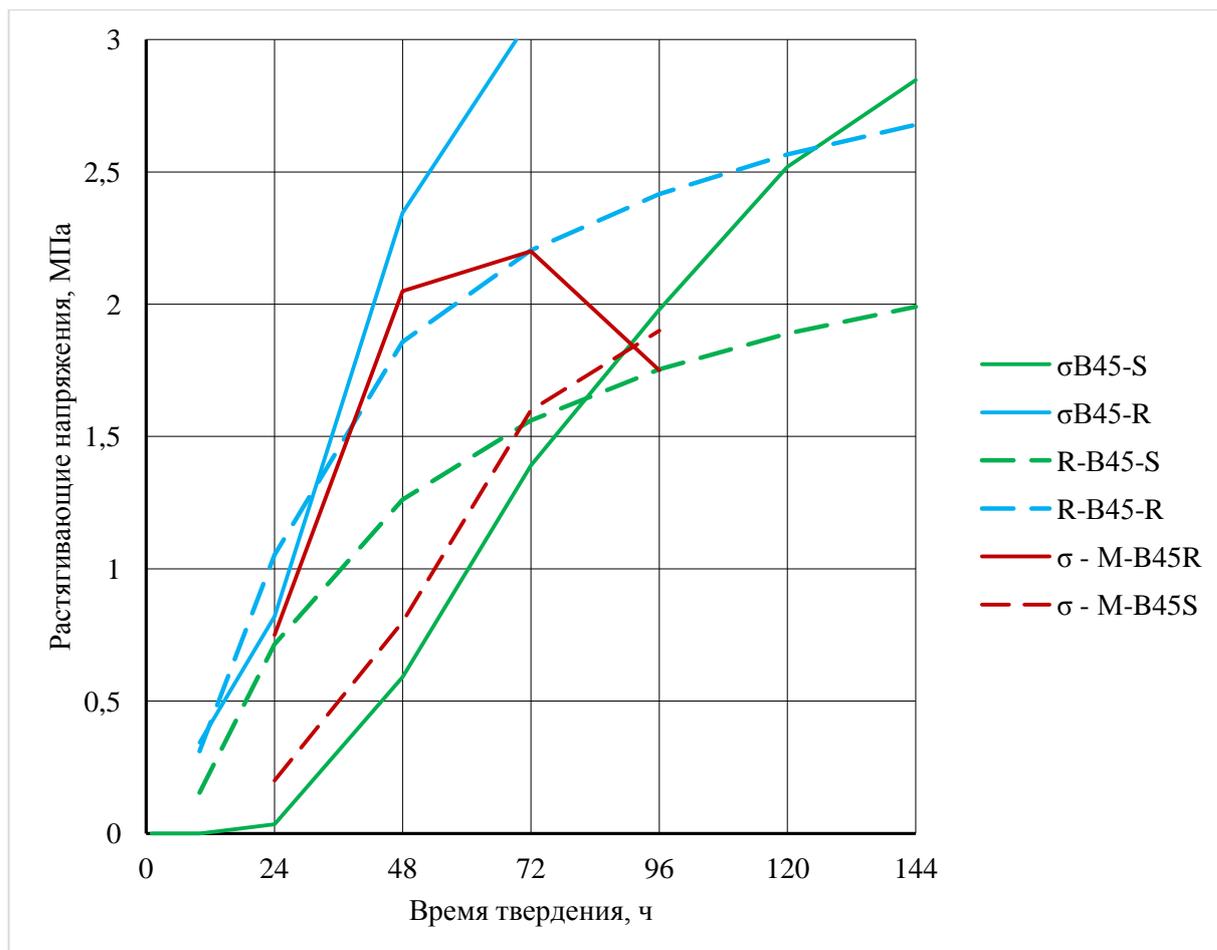


Рис. 5. - Изменение во времени растягивающих напряжений на верхней поверхности температурно-усадочного блока из бетона класса В45 σ_{B45-S} , σ_{B45-R} – соответственно расчетные значения растягивающих напряжений по ф. (1-4) для медленно (S) и быстротвердеющего (R) бетона; R-B45-S, R-B45-R – соответственно расчетные значения предела прочности бетона на осевое растяжение; $\sigma - M-B45S$, $\sigma - M-B45R$ – соответственно расчетные значения растягивающих напряжений по методике авторов

На рис. 6 представлены расчетные значения растягивающих напряжений по различным методикам для бетонов класса 25 с различной кинетикой твердения.

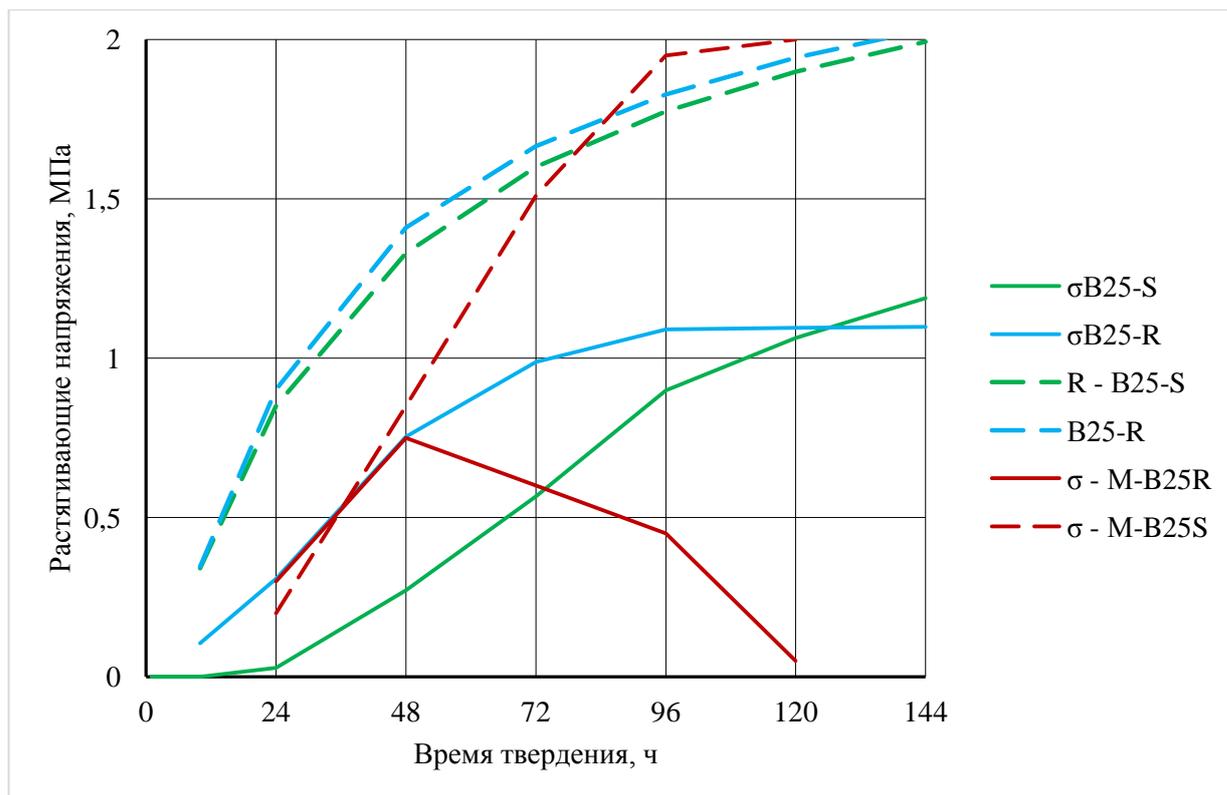


Рис. 6. - Изменение во времени растягивающих напряжений на верхней поверхности температурно-усадочного блока из бетона класса В25 σ_{B25-S} , σ_{B25-R} – соответственно расчетные значения растягивающих напряжений по ф. (1-4) для медленно (S) и быстротвердеющего (R) бетона; R-B25-S, R-B25-R – соответственно расчетные значения предела прочности бетона на осевое растяжение; $\sigma - M-B25S$, $\sigma - M-B25R$ – соответственно расчетные значения растягивающих напряжений по методике авторов

Из представленных на рис. 6 данных очевидно, что вероятность трещинообразования в случае применения быстротвердеющего бетона класса В25 практически исключена. Для медленнотвердеющего бетона класса В25 в возрасте 3,5 сут. величина растягивающих напряжений, определенная по методике авторов, превышает предел прочности бетона на растяжение, при этом время достижения и величина напряжения неплохо коррелирует с

данными [6]. При расчете по ф. (1) вероятность трещинообразования практически отсутствует.

Заключение

Моделирование температурного режима температурно-усадочного блока, выполненное совместно с грунтовым массивом на основе функции тепловыделения бетонов с различной кинетикой твердения, полученной в результате обработки многочисленных экспериментальных данных, позволило получить данные об изменении температуры в центре и на поверхности блока, возводимого по традиционной технологии. Представленные данные свидетельствуют о весьма значительном влиянии, помимо массивности конструкции, таких рецептурных факторов, как класс бетона и кинетика твердения. Предложенная методика расчета температурных напряжений, основанная на предложенных и обоснованных зависимостях свойств бетона от его степени зрелости позволила получить значения напряжений при применении бетонов классов В25 и В45 как быстро, так и медленнотвердеющих. Анализ результатов показал, что при возведении по традиционной технологии подобных конструкций нецелесообразно применение бетонов класса В45, независимо от кинетики их твердения, в связи с высокой вероятностью трещинообразования в период от 1,5 сут. до 3,5 сут. При применении бетонов класса В25 предпочтение следует отдать быстротвердеющим.

Литература

1. 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. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228

2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса "Федерация" // Промышленное и гражданское строительство, 2006, №8. - С. 20-22

3. 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.

4. Добрецова И.В., Галактионов Д.Е. Температурный режим и термонапряженное состояние массивных железобетонных элементов конструкций АЭС при их возведении // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: доклады и выступления Седьмой научно-технической конференции, 2013. - С. 55-60.

5. Bjøntegaard Øyvind 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.

6. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов // Инженерно-строительный журнал, № 2 (78), 2018. - С. 128–135

7. Шифрин С.А. Теплофизические основы формирования потребительских свойств конструктивных элементов транспортных сооружений из монолитного и сборно-монолитного железобетона: автореф. дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук. – М.: 2007. – 45 с.

8. Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В. Трещиностойкость массивных бетонных конструкций в строительный

период с учетом температурных воздействий // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова, 2019, №8. – С. 30-38.

9. Корянова Ю.И., Несветаев Г.В., Чепурненко А.С., Сухин Д.П. К вопросу моделирования температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных плит // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691

10. 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.

11. Соловьянчик А.Р., Пуляев С.М., Пуляев И.С. Исследование тепловыделения цементов, используемых при строительстве мостового перехода через Керченский пролив // Вестник СибАДИ, 2018, №2 (60). – С. 283-293.

12. Адамцевич А.О., Пашкевич С.А., Пустовгар А.П. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения // Инженерно-строительный журнал, 2013, Т. 38, № 3. - С. 36–42.

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

14. Kumar Mehta P., Monteiro P. J. M. Concrete, microstructure, properties and materials. – USA: Mc Graw Hill, 2001. – 239 p.

15. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. – USA: American Concrete Institute, 2007. – 32 p.

References

1. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Suxin D.P. Inzhenernyy vestnik Dona, 2021, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/2021/7228
2. 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, 2006, №8. pp. 20-22
3. Murtazaev S.A.Yu., Sajdumov M.S., Alasxanov A.X., Murtazaeva T.S.A. Vy`sokoprochny`e betony` povy`shennoj zhiznesposobnosti dlya konstrukcij fundamentov MFK «Axmat-Taue`r» [High-strength concretes of increased vitality for the structures of foundations of the MFC "Akhmat-Tower"], Fundamental`ny`e osnovy` stroitel`nogo materialovedeniya. Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo oglajn-kongressa, 2017. pp. 875-883.
4. Dobreczova I.V., Galaktionov D.E. Temperaturny`j rezhim i termonapryazhennoe sostoyanie massivny`x zhelezobetonny`x e`lementov konstrukcij AE`S pri ix vozvedenii [Temperature regime and thermal stress state of massive reinforced concrete elements of NPP structures during their construction], Hidroe`nergetika. Novy`e razrabotki i texnologii: doklady` i vy`stupleniya Sed`moj nauchno-texnicheskoj konferencii, 2013. pp. 55-60.
5. Bjøntegaard Øyvind 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.
6. Struchkova A.Ya., Barabanshnikov Yu.G., Semenov K.V., Shajbakova A.A. Inzhenerno-stroitel`ny`j zhurnal, 2018, № 2 (78). pp. 128-135
7. Shifrin S.A. Teplofizicheskie osnovy` formirovaniya potrebitel`skix svojstv konstruktivny`x e`lementov transportny`x sooruzhenij iz monolitnogo i sborno-monolitnogo zhelezobetona [Thermophysical bases for the formation of consumer properties of structural elements of transport structures from monolithic

and precast-monolithic reinforced concrete]: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. dok. texn. nauk. M.: 2007. 45 p.

8. Makeeva A.V., Semenov K.V., Makeev A.A., Amelina A.V. Vestnik BGTU imeni V.G. Shuxova, 2019. №8, pp. 30-38.

9. Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V., Chepurnenko A.S., Suxin D.P. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691

10. 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

11. Solov`yanchik A.R., Pulyaev S.M., Pulyaev I.S. Vestnik SibADI, 2018, №2 (60). pp. 283-293

12. Adamcevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. Inzhenerno-stroitel`ny`j zhurnal, 2013, T. 38, № 3. pp. 36-42.

13. Nesvetaev G.V., Ta Van Fan Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2013, №3. URL: naukovedenie.ru/PDF/29trgsu313.pdf

14. Kumar Mehta P., Monteiro P. J. M. Concrete, microstructure, properties and materials. USA: Mc Graw Hill, 2001. 239 p.

15. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. USA: American Concrete Institute, 2007. 32 p.