

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

УДК 666.97

Оценка термонапряженного состояния бетонного массива

Кандидаты техн. наук, доценты С. Н. Ковшар¹⁾, П. В. Рябчиков¹⁾,
инж. С. В. Гущин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье изложена методика оценки термонапряженного состояния бетонного массива фундаментной плиты, изготовленной из самоуплотняющейся бетонной смеси. Предлагаемая методика заключается в предварительном расчете температурных полей в твердеющем бетоне. Объектами исследований являлись самоуплотняющаяся бетонная смесь и конструкционный бетон в массиве конструкции. Приведен и обоснован выбор материалов для приготовления бетонной смеси. Для оценки термонапряженного состояния использован состав самоуплотняющегося бетона. С целью снижения величины саморазогрева бетона применяли вяжущее с пониженной экзотермией. Выполнены исследования по оценке удельного тепловыделения рекомендованного цемента в зависимости от начального водоцементного отношения. Изучено влияние химической добавки на скорость и величину удельного тепловыделения цемента. Приведены основные теоретические положения и алгоритм расчета термонапряженного состояния бетонного массива. Для расчета ожидаемых температур и их распределения в массиве конструкции использовали метод конечных разностей, а для оценки термонапряженного состояния рассчитывали температурные напряжения в сечениях бетонного массива. Выполненные расчеты температурных полей позволили оценить максимально возможные температуры и температурные перепады по сечениям бетонного массива в зависимости от начальной температуры бетонной смеси и среднесуточной температуры наружного воздуха. Анализ распределения температур выявил наиболее опасные сечения бетонного массива. На основании результатов расчета температурных полей проведена оценка термонапряженного состояния бетонного массива. Выполнен расчет температурных напряжений в наиболее опасных сечениях бетонного массива. Показано, что характеристикой термонапряженного состояния бетонного массива может служить расчетная величина температурного напряжения. Образование температурных трещин в бетонном массиве возможно при превышении расчетного значения температурного напряжения над фактической прочностью бетона на растяжение. Сравнение расчетных и фактических значений температур в сечениях фундаментной плиты позволило сделать вывод о правильности выполненных расчетов температурных полей и, как следствие, о возможных температурных деформациях.

Ключевые слова: бетон, экзотермия, температура, саморазогрев, удельное тепловыделение, температурные поля

Для цитирования: Ковшар, С. Н. Оценка термонапряженного состояния бетонного массива / С. Н. Ковшар, П. В. Рябчиков, С. В. Гущин // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

Assessment of Thermally Stressed State of Concrete Massif

S. N. Kovshar¹⁾, P. V. Ryabchikov¹⁾, S. V. Gushchin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes a technique for assessing the thermally stressed state of a concrete massif of a foundation slab made of a self-compacting concrete mixture. The proposed method consists in a preliminary calculation of temperature fields in hardening concrete. The objects of research have been self-compacting concrete mix and structural concrete in the structure

Адрес для переписки

Ковшар Сергей Николаевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

Address for correspondence

Kovshar Sergey N.
Belarusian National Technical University
12, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-73
smits@bntu.by

mass. The choice of materials for the preparation of a concrete mixture is given and substantiated. The composition of self-compacting concrete has been used to assess the thermally stressed state. A binder with a reduced exotherm has been used in order to reduce the self-heating of concrete. Studies have been carried out to assess the specific heat release of the recommended cement depending on the initial water-cement ratio. The effect of a chemical additive on the rate and magnitude of the specific heat release of cement has been studied. The paper presents the main theoretical provisions and an algorithm for calculating the thermal stress state of a concrete massif. The finite difference method has been used to calculate the expected temperatures and their distribution in the structure mass, and the temperature stresses in the sections of the concrete mass have been calculated to assess the thermally stressed state. The performed calculations of the temperature fields have made it possible to estimate the maximum possible temperatures and temperature differences over the sections of the concrete massif depending on the initial temperature of the concrete mixture and the average daily temperature of the outside air. Analysis of the temperature distribution has revealed the most dangerous sections of the concrete mass. An assessment of the thermal stress state of the concrete mass has been made on the basis of the results pertaining to calculation of temperature fields. The calculation of temperature stresses in the most dangerous sections of the concrete massif has been performed. It is shown that the calculated value of the temperature stress can serve as a characteristic of the thermally stressed state of the concrete mass. The formation of temperature cracks in a concrete mass is possible when the calculated value of the temperature stress exceeds the actual tensile strength of concrete. Comparison of the calculated and actual values of temperatures in the sections of the foundation slab has made it possible to conclude that the calculations of the temperature fields and, as a consequence, possible temperature deformations are correct.

Keywords: concrete, exotherm, temperature, self-heating, specific heat release, temperature fields

For citation: Kovshar S. N., Ryabchikov P. V., Gushchin S. V. (2021) Assessment of Thermally Stressed State of Concrete Massif. *Science and Technique*. 20 (3), 207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215> (in Russian)

Введение

Температурное воздействие вызывает изменение напряженно-деформированного состояния сооружений как в строительный, так и в эксплуатационный периоды [1, 2].

Температурный режим бетонного массивного блока формируется под воздействием многих факторов. К ним относятся: экзотермия цемента, состав бетона (расход цемента, водоцементное отношение, наличие химических и минеральных добавок, влияющих на экзотермию цемента) и внешние факторы (температура воздуха, температура основания и опалубки, воздействие инсоляции, наличие ветра и его направление). Кроме того, на формирование температурного поля влияют множество технологических факторов: схема бетонирования, температура укладываемого бетона, толщина укладываемых бетонных слоев, интенсивность бетонирования, использование искусственного охлаждения бетонного массива и т. д.

В процессе возведения массива и интенсивного тепловыделения цемента происходит значительный нагрев внутренней зоны массива. В результате этого могут возникать большие температурные перепады, которые вызывают существенные растягивающие напряжения и приводят к трещинообразованию бетона наружных слоев конструкции [3]. Возникновение температурных трещин связано с температурными перепадами между центральной

частью конструкции и слоями бетона ее наружной поверхности. Допустимая разность температур может быть принята между ядром массива и боковыми поверхностями 15–25 °С, между ядром и открытой поверхностью конструкции – до 20 °С [4]. Точные значения разности температур могут быть получены в результате расчета температурных полей и термонапряженного состояния бетонного массива. Для оценки вероятности образования трещин в бетонном массиве можно также использовать величину градиента температур по сечению конструкции, которая не должна превышать 50 °С/м [5].

Материалы и состав бетона

В качестве вяжущего для приготовления бетонной смеси был выбран шлакопортландцемент (табл. 1). Выбор данного вяжущего обусловлен уменьшением возможной величины саморазогрева бетона за счет использования цемента с пониженной экзотермией [6].

В качестве крупного заполнителя для бетона применяли гранитный щебень производства РУПП «Гранит» фракции 5–20 мм 1-й группы с прочностью, соответствующей марке по дробимости ≥ 1400 [6]. Заполнитель – природный (мытый) песок по ГОСТ 8736–2014 с модулем крупности от 2,0 до 2,5 и с содержанием пылевидных и глинистых частиц до 2 % по массе [6].

Таблица 1

Характеристики цемента

Cement characteristics

Завод-изготовитель	Марка (класс) цемента	Активность цемента, МПа		Вещественный состав цемента, %*		$K_{нт}$	$H_{сх}$, мин
		2 сут.	28 сут.	Клинкерная часть*	Доменный шлак		
ОАО «Белорусский цементный завод»	ЦЕМ II/В-Ш 42,5Н	15,3	44,7	60–65	35–40	0,275	230

*Клинкерная часть с учетом содержания 3–4 % гипса.

Поскольку конструкцию планировалось бетонировать с использованием самоуплотняющейся бетонной смеси, в составе последней предусмотрели применение минеральной и химической добавок. В качестве таких были выбраны соответственно микрокремнезем по СТБ EN 13263-1-2012 [6] с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе и суперпластификатор «Динамикс ПК». Для выполнения расчетов по распределению температурных полей принимали состав бетонной смеси, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Состав бетонной смеси
Concrete mix composition

Расход составляющих, кг на 1 м ³ бетонной смеси					
Цемент	Песок	Щебень	Минеральная добавка	Химическая добавка	Вода
400	930	930	44	10,36	170

Оценка удельного
тепловыделения цемента

Для выполнения расчетов по возможному распределению температурных полей в бетонном массиве необходимы данные о величине удельного тепловыделения цемента. Для его определения использовали разработанную в БНТУ установку (рис. 1).

Принцип проведения испытаний в установке в основном аналогичен определению теплоты гидратации цемента термосным методом [7]. Однако от классической установки остается только один принцип – измерение кинетики изменения температуры, вначале обычно возрастающей, а затем плавно снижающейся. Для фиксации изменяющейся температуры использовали малогабаритные беспроводные датчики DS 1921 системы «Термохрон», показавшие свою эффективность при исследовании тепловых процессов [8–10].

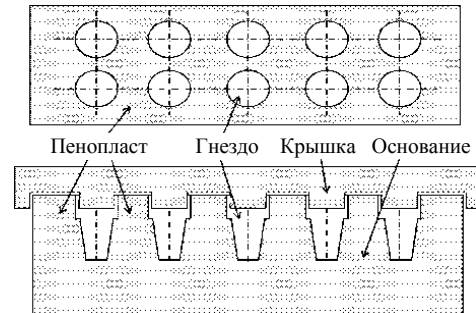


Рис. 1. Схема установки для определения кинетики изменения температуры твердеющего цементного теста

Fig. 1. Installation diagram for determining kinetics temperature changes of hardening cement paste

Влияние начального водосодержания и пластифицирующей добавки на кинетику тепловыделения цемента оценивали на цементном тесте с водоцементным отношением от 0,275 до 0,500, что соответствует водосодержанию X от 1,0 до 1,8.

Для оценки влияния пластифицирующей добавки на цементное тесто (при указанных выше водоцементных отношениях) вводили добавку в количестве 1 % от массы цемента по сухому веществу. Количество воды при этом оставалось постоянным. На рис. 2, 3 приведены результаты оценки изменения температуры цементного теста, твердеющего в калориметре в течение 40 ч.

Анализ данных рис. 2, 3 показывает, что с увеличением водоцементного отношения максимальная температура саморазогрева цементного теста закономерно снижается. Это связано с уменьшением количества вяжущего в объеме цементного теста при увеличении В/Ц. Введение пластифицирующей добавки позволяет: во-первых, снизить максимальную температуру саморазогрева, и тем больше, чем выше водоцементное отношение, и, во-вторых, существенно замедлить время достижения максимальной температуры саморазогрева.

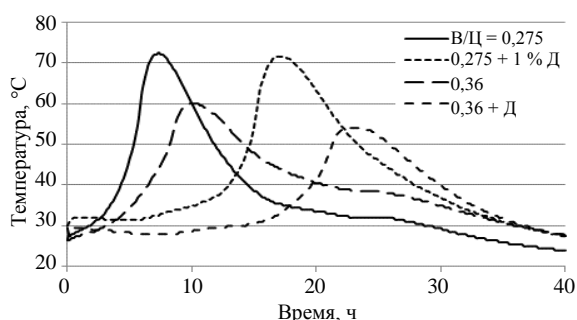


Рис. 2. Изменение температуры при твердении цементного теста с водоцементным отношением 0,275 и 0,36 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 2. Temperature change during hardening of cement paste with water-cement ratio of 0.275 and 0.36 without and with addition of plasticizer

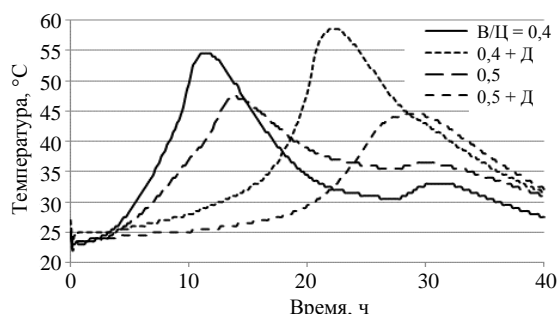


Рис. 3. Изменение температуры при твердении цементного теста с водоцементным отношением 0,4 и 0,5 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 3. Temperature change during hardening of cement paste with water-cement ratio of 0.4 and 0.5 without and with addition of plasticizer

После обработки экспериментальных данных построены кривые удельного тепловыделения цемента, представленные на рис. 4, 5.

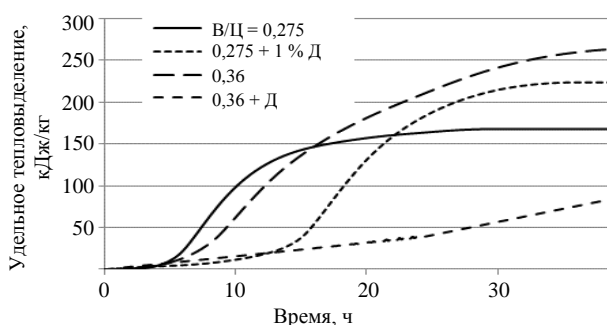


Рис. 4. Удельное тепловыделение цемента во времени для цементного теста с водоцементным отношением 0,275 и 0,36 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 4. Specific heat release of cement over time for cement paste with water-cement ratio of 0.275 and 0.36 without and with addition of plasticizer

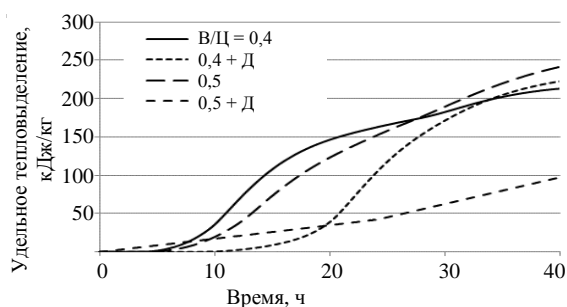


Рис. 5. Удельное тепловыделение цемента во времени для цементного теста с водоцементным отношением 0,4 и 0,5 без добавки и с добавкой пластификатора

Fig. 5. Specific heat release of cement over time for cement paste with water-cement ratio of 0.4 and 0.5 without and with addition of plasticizer

Анализ данных рис. 4, 5 показывает, что введение пластифицирующей добавки в количестве 1 % от массы цемента позволяет существенно замедлить тепловыделение цемента в первые сутки твердения. В дальнейшем (после торможения) величина тепловыделения цемента с добавкой либо равна, либо превосходит величину тепловыделения цемента без добавки.

Основные теоретические положения и алгоритм расчета термонапряженного состояния в бетонном массиве

В расчетах термонапряженного состояния массивных бетонных конструкций последовательно решаются две задачи:

- определение температурных полей (термическая задача);
- установление напряжений в бетоне, возникающих от изменения температуры и ее неравномерного распределения.

Для расчета температурных полей в твердеющем бетоне за основу принимают дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для систем с внутренними равномерно распределенными источниками теплоты [11]

$$\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 t + \frac{1}{c\gamma} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности; ∇^2 – оператор Лапласа; c – удельная теплоемкость; γ – плотность.

Расчеты температурных полей производили по методу конечных разностей.

Удельное тепловыделение цемента (бетона), определенное экспериментально, пересчитывали на изотермическое тепловыделение (при постоянной температуре), получая уравнение следующего вида [11]:

$$Q = Q_{\max} \left[1 - (1 + A_{20}\tau)^{-0,833} \right], \quad (2)$$

где Q – текущее тепловыделение цемента; Q_{\max} – максимальное тепловыделение цемента; A_{20} – коэффициент темпа тепловыделения цемента при постоянной температуре твердения 20 °С, сут.⁻¹

Изменение темпа (скорости) тепловыделения в зависимости от изменения температуры бетона учитывали коэффициентом A_t , который определяли по формуле [11]

$$A_t = A_{20} \cdot 2^{\frac{t-20}{10}}. \quad (3)$$

Повышение температуры в заданном сечении за интервал времени Δt вследствие тепловыделения определяли согласно [11]

$$\Delta t_Q = \frac{Q_{\max}}{c\gamma} \Delta \varepsilon, \quad (4)$$

где $\Delta \varepsilon$ – коэффициент темпа тепловыделения бетона при постоянной температуре твердения 20 °С, сут.⁻¹

В (4) $\Delta \varepsilon$ – приращение относительного тепловыделения бетона за интервал времени Δt , которое определяли по формуле [11]

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_\tau - \varepsilon_{\tau-\Delta t}, \quad (5)$$

где ε_τ – относительное тепловыделение бетона к моменту времени τ , определяемое как [11]

$$\varepsilon_\tau = \frac{Q_\tau}{Q_{\max}}. \quad (6)$$

Выполнив расчеты температурных полей в бетонном массиве, переходим к расчету термонапряженного состояния. Для этого определим температурные напряжения [1]

$$\sigma = E\alpha\Delta t, \quad (7)$$

где E – модуль упругости бетона, МПа; α – коэффициент линейного расширения бетона, 1/°С; Δt – перепад температуры, °С.

Изменение модуля упругости бетона по времени [11]

$$E(\tau) = E_0 (1 - \vartheta e^{-\beta\tau}), \quad (8)$$

где E_0 – значение модуля упругости бетона при прочности, соответствующей проектному классу, МПа; ϑ , β – параметры, зависящие от вида бетона, могут быть приняты равными соответственно 1,0 и 0,0086; τ – время твердения, ч.

Расчет температурных полей при твердении бетона массивной конструкции

Объем бетонируемой конструкции составлял 9000 м³. Расчет температурных полей в твердеющем бетоне проводили методом конечных разностей [11] с использованием ПЭВМ. При выполнении расчетов высота бетонного массива была принята по проектной документации и составляла 3,5 м. Исходя из заданной высоты конструкции, минимальное количество сечений для требуемой точности расчетов температурных полей должно составлять не менее семи. Также, исходя из предполагаемой схемы бетонирования конструкции (непрерывное бетонирование горизонтальными слоями со скоростью 1 м/сут.), количество сечений целесообразно принять не менее семи. Окончательно при выполнении расчетов количество сечений было принято равным семи с расстоянием между сечениями 500 мм. При расчете температур второго и последующих сечений за начальную температуру бетона принимали среднюю температуру нижележащего сечения к моменту начала бетонирования слоя, в котором расположено сечение. Расчеты производились для двух вариантов при среднесуточной температуре наружного воздуха 15 и 20 °С. Расчет температуры выполняли для 10 сут. твердения бетонного массива.

Результаты расчетов распределения температур по сечениям бетонного массива представлены на рис. 6, 7.

Выполненные расчеты температурных полей (рис. 6, 7) показывают, что максимальный перепад температур не превышает 17 и 24 °С при среднесуточной температуре наружного воздуха соответственно 15 и 20 °С.

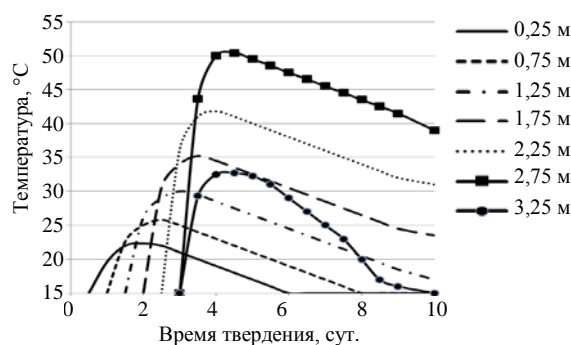


Рис. 6. Расчетное изменение температуры по сечениям бетонного массива при твердении в течение 10 сут. при среднесуточной температуре наружного воздуха и температуре бетонной смеси 15 °С

Fig. 6. Calculated temperature change over sections of concrete massif during hardening for 10 days at average daily temperature of outside air and temperature of concrete mixture 15 °С

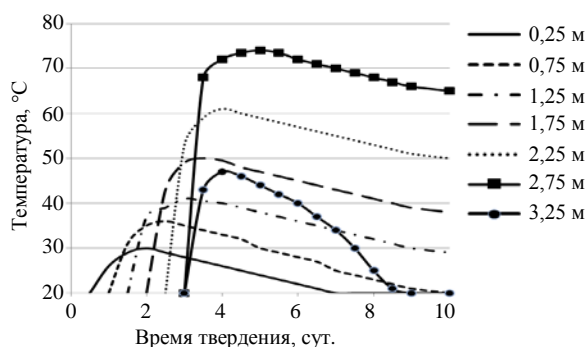


Рис. 7. Расчетное изменение температуры по сечениям бетонного массива при твердении в течение 10 сут. при среднесуточной температуре наружного воздуха и температуре бетонной смеси 20 °С

Fig. 7. Calculated temperature change over sections of concrete massif during hardening for 10 days at average daily outside air temperature and concrete mixture temperature of 20 °С

По результатам расчета максимальная температура саморазогрева возможна в сечении 2,75 м и составляет 51 и 75 °С при среднесуточной температуре наружного воздуха соответственно 15 и 20 °С. Анализ распределения температур показывает, что максимальный их перепад возможен между сечениями 2,75–3,25 м и 1,75–2,75 м (рис. 8). Нетрудно предположить, что в этих сечениях температурные напряжения будут иметь максимальные значения.

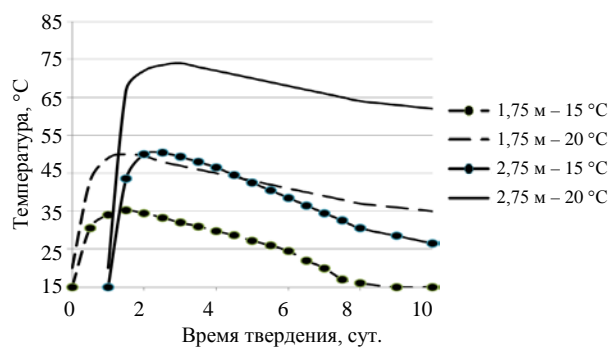


Рис. 8. Расчетное изменение температуры в сечениях 1,75 и 2,75 м бетонного массива при среднесуточной температуре 15 и 20 °С

Fig. 8. Calculated temperature change in sections 1.75 and 2.75 m of concrete massif at average daily temperature of 15 and 20 °С

Оценка термонапряженного состояния бетонного массива

Согласно расчетным данным, приведенным на рис. 6, 7, максимальный перепад температуры возможен между сечениями 2,75 и 3,25 м, 1,75 и 2,75 м соответственно. Перепадом температур между сечениями 2,75 и 3,25 м можно управлять технологическими приемами, изменяя (снижая) величину теплоотдачи верхнего слоя конструкции. Таким образом, оценку температурных напряжений проводили для сечений бетонного массива (1,75 и 2,75 м), между которыми на основании расчета возможен максимальный перепад температур и влияют на которые технологически не представляется возможным. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что максимальное значение температурных напряжений наблюдается при среднесуточной температуре наружного воздуха 20 °С в возрасте около 3 сут. твердения, а при среднесуточной температуре наружного воздуха 15 °С – около 4 сут. твердения.

Для оценки вероятности образования трещин в бетонном массиве в наиболее опасных сечениях 1,75 и 2,75 м необходимо иметь значение прочности бетона на осевое растяжение. Условие отсутствия трещин в бетонном массиве

$$f_{ct} \geq \sigma. \quad (9)$$

Расчетные значения температурных напряжений бетонного массива
Calculated values of temperature stresses of concrete massif

Время твердения, сут.	Исходные данные и расчетные температурные напряжения в бетонном массиве при температуре твердения							
	15 °С				20 °С			
	Δt , °С	E_0 , МПа	$E(\tau)$, МПа	σ , МПа	Δt , °С	E_0 , МПа	$E(\tau)$, МПа	σ , МПа
0	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	–	–	–	–	–	–	–	–
1	12	37000	6900	0,69	18	37000	6900	1,24
2	16	37000	12514	2,00	24	37000	12514	3,00
3	17	37000	17080	2,90	20	37000	17080	3,42
4	15	37000	20795	3,11	16	37000	20795	3,33
5	11	37000	23817	2,62	12	37000	23817	2,85

С достаточной для практических целей точностью прочность бетона на осевое растяжение можно определить по формуле

$$f_{ct} = 0,29 f_{cube}^{0,6}, \quad (10)$$

где $f_{cube}^{0,6}$ – прочность бетона на сжатие, МПа.

Для определения значения прочности бетона на сжатие в эквивалентном возрасте использовали ранее полученные результаты по оценке кинетики твердения бетона [6]. Прочность бетона на сжатие определяли интерполяцией в зависимости от возраста и средней температуры твердения бетона, которую, в свою очередь, также определяли интерполяцией по результа-

там расчета температурных полей в бетонном массиве.

В табл. 4 приведены результаты расчета прочности на осевое растяжение бетона и температурных деформаций в двух сечениях бетонного массива при твердении со средней температурой наружного воздуха 15 и 20 °С.

Анализ данных, приведенных в табл. 4, показывает, что возраст 2–4 сут. является критическим для бетона. В этот период высока вероятность образования температурных трещин. Также следует отметить, что снижение температуры наружного воздуха на 5 °С уменьшает вероятность образования трещин в бетонном массиве.

Расчетные значения прочности бетона на осевое растяжение
и температурных деформаций бетонного массива в сечениях «1,75 м» и «2,75 м»
Calculated values of concrete axial tensile strength and thermal deformations
of concrete massif in sections “1.75 m” and “2.75 m”

Время твердения, сут.	Расчетные значения прочности на осевое растяжение и температурных деформаций бетона фундаментной плиты при температуре твердения											
	15 °С в сечениях						20 °С в сечениях					
	1,75 м			2,75 м			1,75 м			2,75 м		
	f_{ct} , МПа	σ , МПа	$f_{ct} - \sigma$, МПа	f_{ct} , МПа	σ , МПа	$f_{ct} - \sigma$, МПа	f_{ct} , МПа	σ , МПа	$f_{ct} - \sigma$, МПа	f_{ct} , МПа	σ , МПа	$f_{ct} - \sigma$, МПа
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	1,6	0,7	0,9	2,3	0,7	1,6	2,3	1,2	1,1	2,9	1,2	1,7
2	2,3	2,0	0,3	3,1	2,0	1,1	3,1	3,0	0,1	3,3	3,0	0,3
3	3,0	2,9	0,1	3,4	2,9	0,5	3,4	3,4	0	3,5	3,4	0,1
4	3,3	3,1	0,2	3,5	3,1	0,4	3,5	3,3	0,2	3,5	3,3	0,2
5	3,4	2,6	0,8	3,5	2,6	0,9	3,5	2,8	0,7	3,6	2,8	0,8

Сравнение расчетных и фактических значений температур в сечениях фундаментной плиты

Бетонирование фундаментной плиты производилось в период с 14 по 16 сентября 2020 г. Суммарно было уложено 9063 м³ бетонной смеси. Для контроля температур в процессе твердения фундаментной плиты использовали резистивные датчики температуры (термометры сопротивления), которые устанавливали на трех высотных отметках (100, 1750 и 3400 мм от основания плиты). Температурные датчики крепились к арматурному стержню проволочными скрутками и устанавливались в арматурный каркас фундаментной плиты непосредственно перед бетонированием. Датчики, установленные по периметру фундаментной плиты, размещались на расстоянии не менее 1000 мм от опалубки. Температуру контролировали в 99 точках по сечению плиты.

На рис. 9 представлен график изменения расчетных и фактических значений максимальных температур саморазогрева бетона по высоте фундаментной плиты.

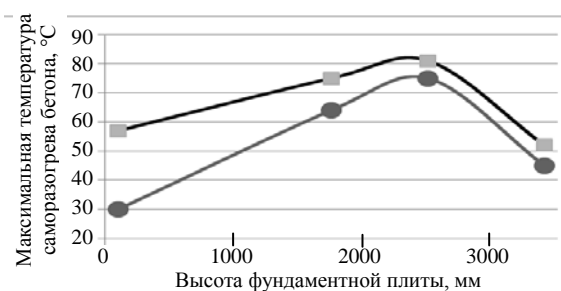


Рис. 9. Расчетные и фактические значения максимальных температур саморазогрева бетона по высоте фундаментной плиты: —●— расчет; —■— факт

Fig. 9. Calculated and actual values of maximum temperatures of concrete self-heating in height of foundation slab: —●— calculation; —■— actual

Анализ тенденции изменения расчетных и фактических значений максимальных температур саморазогрева бетонного массива по высоте фундаментной плиты (рис. 9) позволяет сделать вывод о возможных причинах расхождений расчетных и фактических значений температур:

– расчет выполнялся для средней температуры наружного воздуха 20 °С. Фактическая температура воздуха при бетонировании центральной части плиты (в отметках от –11950 до –10950) изменялась в диапазоне от 22 до 24 °С (повышение температуры воздуха на 5 °С приводит к повышению температуры саморазогрева бетона на (15–20) °С);

– в расчетах скорость бетонирования принималась 3000 м³/сут. По факту скорость бетонирования составила 5170 м³/сут. Увеличение скорости бетонирования могло привести к повышению температуры саморазогрева бетона на (5–10) °С;

– при выполнении расчета теплопоглощающая способность основания принималась максимальной (как наиболее неблагоприятный вариант с позиции перепада температур между нижним сечением плиты и ее центром). Фактические значения температур в нижнем сечении плиты свидетельствуют о достаточно низкой теплопоглощающей способности основания, что существенно снизило перепад температур и, следовательно, величину температурных деформаций.

На рис. 10 показаны кривые изменения средней температуры саморазогрева бетона по сечениям фундаментной плиты в зависимости от продолжительности твердения, построенные на основании данных контроля (мониторинга) температур.

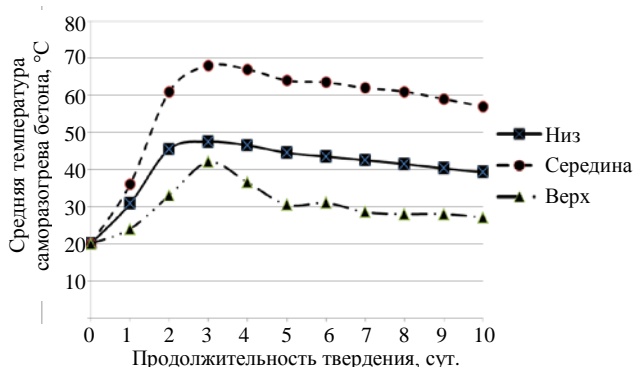


Рис. 10. Изменение средней температуры саморазогрева бетона по сечениям фундаментной плиты в зависимости от продолжительности твердения

Fig. 10. Average temperature change in concrete self-heating along sections of foundation slab depending on duration of hardening

ВЫВОДЫ

1. Характеристикой термонапряженного состояния бетонного массива может служить расчетная величина температурного напряжения. Выполненные расчеты температурных полей для твердеющего бетона заданного состава на цементе с пониженной экзотермией позволили определить величины температурных напряжений в наиболее опасных сечениях бетонного массива. Из расчетных данных следует, что критическим для твердеющего бетона является

возраст 2–4 сут. В этот период высока вероятность образования температурных трещин.

2. Снижение температуры наружного воздуха на 5 °С уменьшает вероятность образования трещин в бетонном массиве. Сравнение фактических значений температур с расчетными показало правильность принятой методики расчета температурных полей. Незначительные отклонения расчетных значений температур от фактических связаны с условиями ведения бетонных работ.

ЛИТЕРАТУРА

- Ahmad, S. Controlling Temperatures in Mass Concrete / S. Ahmad // 34th Conference on Our World in Concrete & Structures, 16–18 Aug. 2009. Singapore, 2009. 9 p.
- Analysis of Cracking Risk in Early Age Mass Concrete with Different Aggregate Types / V. Klemczak [et al.] // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. P. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>.
- Анискин, Н. А. Прогноз трещинообразования бетонных массивных плотин при возведении в суровых климатических условиях / Н. А. Анискин, Х. Нгуен // *Вестник МГСУ*. 2014. № 8. С. 165–178. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.8.165-178>.
- Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов / Н. А. Анискин [и др.] // *Вестник МГСУ*. 2018. № 11. С. 1407–1418. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418>.
- Bergin Importance of Insulation at the Bottom of Mass Concrete Placed on Soil with High Groundwater / T. A. Do [et al.] // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2013. Vol. 2342, Iss. 1. P. 113–120. <https://doi.org/10.3141/2342-14>.
- Разработать составы бетона, провести расчет термонапряженного состояния в процессе его твердения и осуществить контроль качества при возведении конструкции фундаментной плиты высотного здания на объекте «Строительство многофункционального комплекса в г. Минске в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка»: отчет о НИР по х/д № 2917/20кбр., науч. рук. Э. И. Батяновский. Этап 1.
- Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. М.: Стройиздат, 1984. 225 с.
- Бибик, М. С. Общие принципы проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. Гродно, 2010. С. 292–296.*
- Бибик, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // *Строительная наука и техника*. 2010. № 4. С. 23–26.
- Бибик, М. С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // *Строительная наука и техника*. 2010. № 4. С. 55–59.
- Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окорочков, А. А. Парийский. Л.: Изд-во литературы по стр-ву, 1966. 313 с.

Поступила 04.02.2021

Подписана в печать 14.04.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

- Ahmad S. (2009) Controlling Temperatures in Mass Concrete. 34th Conference on Our World in Concrete & Structures, 16–18 Aug. 2009. Singapore. 9.
- Klemczak B., Batog M., Pilch M., Žmij A. (2017) Analysis of Cracking Risk in Early Age Mass Concrete with Different Aggregate Types. *Procedia Engineering*, 193, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>.
- Aniskin N. A., Nguyen H. (2014) Forecast of Cracking of Concrete Massive Dams During Construction in Harsh Climatic Conditions. *Vestnik MGSU*, (8), 165–178. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.8.165-178> (in Russian).
- Aniskin N. A., Nguyen Trong Chuc, Bryansky I. A., Dam Huu Hung (2018) Determination of the Temperature Field and Thermally Stressed State of the Laid Concrete Mass by the Finite Element Method. *Vestnik MGSU*, (11), 1407–1418. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418> (in Russian).
- Do T. A., Lawrence A. M., Tia M., Bergin M. J. (2013) Bergin Importance of Insulation at the Bottom of Mass Concrete Placed on Soil with High Groundwater. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2342 (1), 113–120. <https://doi.org/10.3141/2342-14>.
- Batyanovsky E. I. To Develop Concrete Compositions, to Calculate the Thermo-Stressed State in the Process of its Hardening and to Carry Out Quality Control During Erection of the Construction of the Foundation Slab of a High-Rise Building at the Object “Construction of a Multifunctional Complex in Minsk within the Boundaries of Filimonov Str. – Nezavisimosty Avenue – Makayonok Str.”: Research Report on Business Contract No 2917/20кбр. Stage 1 (in Russian).
- Mchedlov-Petrosyan O. P., Usherov-Marshak A. V., Urzhenko A. M. (1984) *Heat Release During Hardening of Binders and Concretes*. Moscow, Stroizdat Publ. 225 (in Russian).
- Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) General Principles on Designing Energy Saving Modes for Heat Treatment of Reinforced Concrete Products in Pit Steaming Chambers. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov: Sb. Nauch. St.* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel: Collection of Scientific Papers]. Grodno, 292–296 (in Russian).
- Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) Evaluation of the Hardening Kinetics of Cement Stone Using the Thermochron Sensors. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (4), 23–26 (in Russian).
- Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) On the Energy-Saving Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (4), 55–59 (in Russian).
- Zaporozhets I. D., Okorokov S. D., Pariysky A. A. (1966) *Heat Dissipation of Concrete*. Leningrad, Publishing House on Construction Literature. 313 (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 14.04.2021

Published online: 31.05.2021