Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2023, Том 15, № 3 / 2023, Vol. 15, Iss. 3 https://esj.today/issue-3-2023.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/17SAVN323.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:
Несветаев, Г. В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния массивной железобетонной фундаментной плиты в ранний период твердения / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корянова, Д. П. Сухин // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 3. — URL: https://esj.today/PDF/17SAVN323.pdf

For citation:
Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Sukhin D.P. Experimental study of the stress-strain state of a massive reinforced concrete foundation slab in the early period of hardening. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(3): 17SAVN323. Available at: https://esj.today/PDF/17SAVN323.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

Несветаев Григорий Васильевич[1]
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Профессор кафедры «Технология строительного производства»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: nesgrin@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4153-1046
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=394531
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57194440967

Корянова Юлия Игоревна[2]
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Доцент кафедры «Технология строительного производства»
Кандидат технических наук
E-mail: koryanova.yi@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2341-9811
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=747733
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Koryanova-Yulia
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57196034514

Сухин Дмитрий Петрович
ООО «Дон-Кубань Строй», Ростов-на-Дону, Россия
Директор
E-mail: 161dks@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5515-6462
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1195780

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния массивной железобетонной фундаментной плиты в ранний период твердения

[1] https://donstu.ru/structure/cadre/nesvetaev-grigoriy-vasilevich/

https://famous-scientists.ru/anketa/nesvetaev-grigorij-vasilevich-3655

[2] https://donstu.ru/structure/cadre/koryanova-yuliya-igorevna/

https://famous-scientists.ru/anketa/koryanova-yuliya-igorevna-17890

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения температуры и относительных деформаций в центре и на поверхности массивной монолитной железобетонной фундаментной плиты в ранний период твердения в зависимости от условий теплообмена с окружающей средой. Расчетно-экспериментальным способом по разработанному алгоритму на основе данных о зрелости бетона и среднестатистических зависимостей между показателями прочности и деформаций определены значения уровня температурно-усадочных растягивающих напряжений. Выполнен анализ некоторых критериев вероятности раннего трещинообразования массивных монолитных железобетонных конструкций. Обоснована недостаточность учета только перепада температуры «центр — поверхность» для оценки вероятности раннего трещинообразования. Показано, что при применении в качестве критерия трещиностойкости отношения предела прочности на осевое растяжение к модулю упругости бетона на неутепленном участке с максимальной величиной перепада температуры «центр — поверхность» измеренная экспериментально величина растягивающих деформаций превысила значение критерия. На этом же участке зафиксировано максимальное значение растягивающих напряжений, превышающее предел прочности бетона на осевое растяжение. Сопоставление результатов экспериментальных исследований показало хорошее соответствие с результатами ранее реализованного численного эксперимента по оценке влияния на величину уровня растягивающих напряжений на поверхности фундаментной плиты таких факторов как время перекрытия слоев, температура среды и бетонной смеси при укладке, класс бетона по прочности на сжатие, кинетики твердения бетона, а также параметров теплоотдачи на границе с окружающей средой. Подтверждена эффективность регулирования коэффициента теплоотдачи с поверхности для снижения уровня растягивающих напряжений и вероятности раннего трещинообразования посредством устройства теплоизолирующего покрытия.

Ключевые слова: массивная монолитная железобетонная конструкция; напряженно-деформированное состояние; фундаментная плита; уровень напряжений; перепад температуры; относительная деформация; коэффициент теплоотдачи

Введение

При возведении монолитных железобетонных конструкций, в т. ч. массивных, широко применяются современные модифицированные бетоны, кинетика твердения, формирование структуры и свойств которых имеет ряд особенностей, обусловленных наличием органоминеральных модификаторов [1]. Обязательным условием обеспечения монолитности возводимых монолитных железобетонных конструкций является предотвращение раннего трещинообразования посредством регулирования температурно-усадочных деформаций, обусловленных температурными градиентами и контракционной усадкой бетона в ранний период [2], а в более поздние сроки усадкой при высыхании [3]. При совпадении по знаку температурных и усадочных деформаций в ранний период с началом остывания (обычно от 1 до 4 сут) вероятность раннего трещинообразования возрастает [4]. Возведение массивных железобетонных фундаментных плит предопределяет высокую интенсивность бетонирования, при этом согласно СП 70.13330.2012, п. 5.3.6 при наличии рабочих швов, например, между температурно-усадочными блоками, «должна быть обеспечена необходимая прочность контакта поверхностей бетона в шве бетонирования», что достаточно проблематично [5]. Возможность обработки рабочих швов перечисленными в СП способами, например, для представленной на рисунке 1 фундаментной плиты размером 37,45х25,6х1,5 м, объемом 1438 м^3, с модулем поверхности 1,47 м$^{-1}$ из бетона класса В40 весьма дискуссионна.

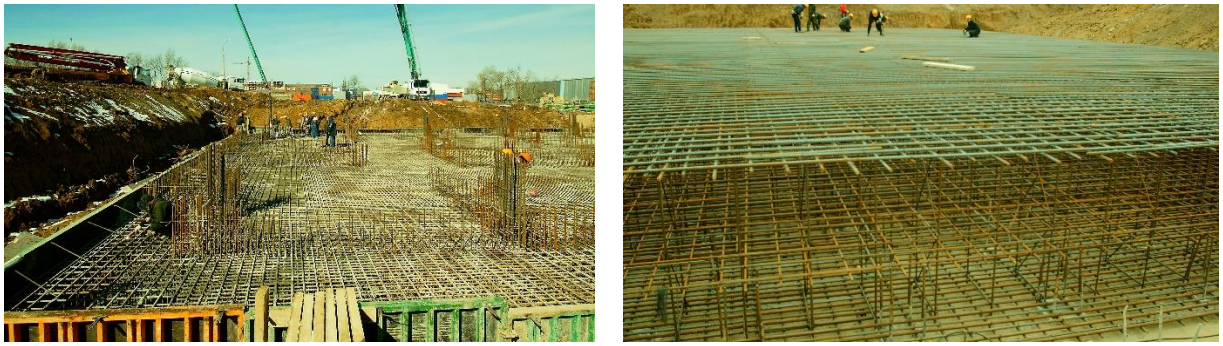


Рисунок 1. *Общий вид исследованной фундаментной плиты в процессе возведения: слева — общий вид фундаментной плиты при бетонировании; справа — пространственный арматурный каркас фундаментной плиты (фото авторов)*

Согласно СП 70.13330.2012, п. 5.3.6 «при бетонировании массивных конструкций самоуплотняющимися бетонными смесями возможен вариант укладки одновременно по всей площадке конструкции с взаимно перекрывающимися зонами растекания смеси», т. е. без устройства рабочих швов, что предопределяет укладку сотен и даже тысяч м^3 бетонной смеси за относительно короткий промежуток времени [6]. Следствием является формирование в твердеющем массиве значительных температурных градиентов [7; 8], в связи, с чем согласно СП 435.1325800.2018, п. 10.6 «в массивных монолитных конструкциях следует предусматривать мероприятия по уменьшению влияния температурно-влажностных полей и напряжений, связанных с экзотермией при твердении бетона, на целостность и трещиностойкость конструкций». Проблема оценки температурных полей и напряжений в связи с риском раннего трещинообразования в ранний период твердения массивных монолитных железобетонных конструкций представляет актуальную задачу [9; 10], для решения которой широко применяются, в т. ч., методы моделирования [11; 12]. Согласно [13][3] растягивающие напряжения в твердеющих железобетонных массивах могут быть определены по формуле (1):

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

где: σ_T — растягивающее напряжение от температурных градиентов, МПа; kr — учитывает степень ограничения на верхней поверхности плиты (0,83 [13]); E — модуль упругости бетона, МПа; α — коэффициент линейного температурного расширения бетона; ΔT — перепад температуры между центром и верхней поверхностью плиты в любой момент времени τ, ºС; φ — коэффициент ползучести бетона.

Несмотря на тот факт, что формула (1) не учитывает влияния деформаций контракционной усадки на напряженно-деформированное состояние, а величина коэффициента ползучести бетона в раннем возрасте величина трудно прогнозируемая, очевидно, что определяющим величину растягивающих напряжений и, следовательно, вероятность трещинообразования, фактором является величина ΔT. Для учета влияния деформаций усадки уравнение формулы (1) можно представить в виде:

$$\sigma_T = \frac{k_r \cdot E}{(1+\varphi)} \cdot (\alpha \cdot \Delta T + \varepsilon_{sh}) = \frac{k_r \cdot E}{(1+\varphi)} \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

[3] ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. — USA: American Concrete Institute. — 2007. — 32 p. URL: https://studocu.com/en-au/document/university-of-wollongong/structural-design-1/aci-2072r-07-report-on-thermal-and-volume-change-effects-on-cracking-of-mass-concrete/8881362.

где ε_{sh}, ε — соответственно деформация усадки и суммарная относительная деформация температурная + усадочная, которая фиксировалась датчиками при измерении в наших исследованиях.

В [14] представлен обзор данных о некоторых температурных параметрах в ранний период возведения массивных плит с модулем поверхности от 1,1 до 2,4 при классах применяемых бетонов от В25 до В45. Температура среды составляла от 4 до 34°С, бетонных смесей от 8 до 29°С, максимальная температура в центре плиты от 44,6 до 71,1°С, на поверхности плиты от 28,2 до 54,3°С, максимальный перепад температуры «центр — поверхность» составил 35,8°С. Время достижения максимальных значений температуры в центре плиты от 24 до 75 ч, на поверхности до 62 ч. Согласно результатам моделирования напряженного состояния температурно-усадочного блока размером 20х20х2 (h) м [12] уровень растягивающих напряжений на верхней поверхности блока в зависимости от класса бетона (В25…В45), кинетики его твердения (быстро, медленно) может составлять 1,1–1,55, при этом важную роль играет перепад температуры «центр — поверхность», значение которого зависит, в т. ч., от коэффициента теплоотдачи с поверхности.

Цель настоящего исследования заключалась в экспериментальной оценке температурных градиентов, деформаций и напряжений в ранний период возведения массивной монолитной железобетонной фундаментной плиты (рис. 1) в зависимости от условий теплообмена с окружающей средой и сопоставлении результатов измерения с результатами моделирования [12; 14].

Методы исследования

Измерение температуры в теле плиты выполнялось термопарами, установленными в центре плиты и на расстоянии 40 мм от поверхности. Измерение деформаций осуществлялось датчиками CS-02. Датчики температуры и деформаций были закреплены на штанге, установленной в арматурный каркас (рис. 2). Пакет проводов выведен на поверхность для подключения к считывающим приборам.

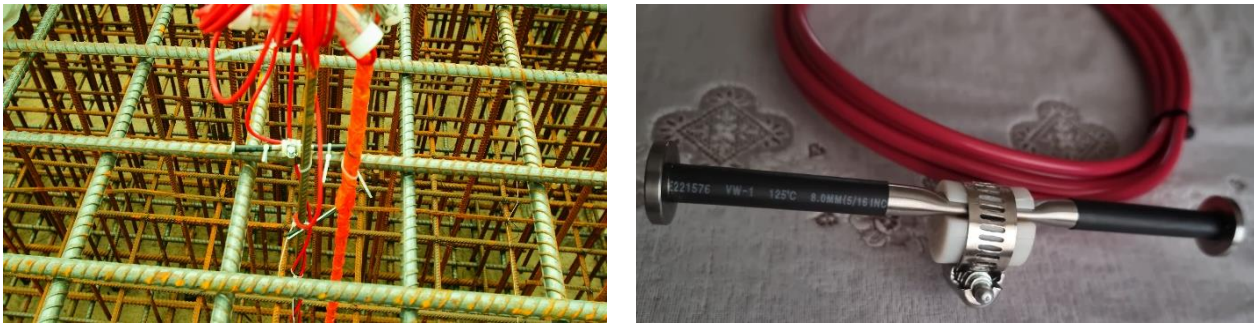
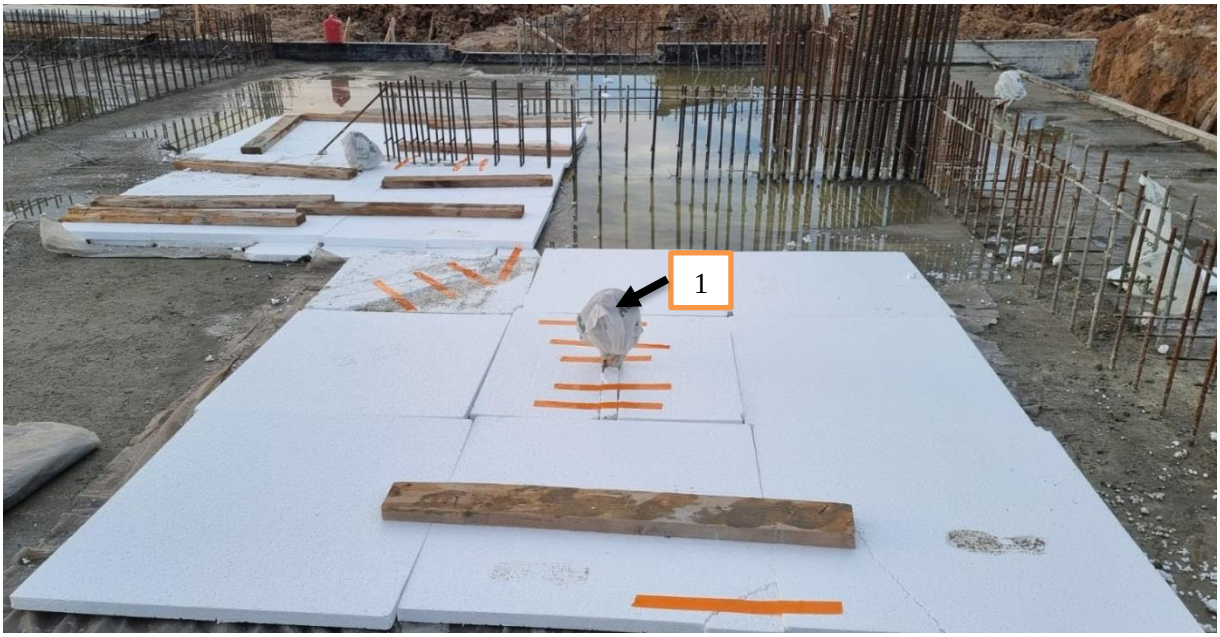


Рисунок 2. *Установка датчиков измерения температуры и деформаций в теле плиты: слева — штанга с датчиками измерения температуры и деформаций, установленная в арматурном каркасе; справа — датчик деформаций CS-02 (фото авторов)*

Замеры температуры и деформаций в плите производились на трех участках: первый имел влагозащитное покрытие, но не имел утепляющего покрытия, на втором и третьем помимо влагозащитного покрытия было устроено теплозащитное покрытие размером 3х3 м (рис. 3) из одного (50 мм) или двух (100 мм) слоев ППС 13 по ГОСТ 15588-2014, при этом штанги с датчиками устанавливались в центре участков. Тепловой поток с поверхности плиты для первого и третьего участка различался до 55 раз. Температура среды в период наблюдений составляла от 7°С в ночное время до 16°С днем.

17SAVN323
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com



1 — пакет проводов от датчиков измерения температуры и деформаций в защитном чехле

Рисунок 3. *Общий вид участков с утепленной поверхностью (фото авторов)*

Определение уровня растягивающих напряжений выполняли по следующему алгоритму:

- Для каждого участка для центра и поверхности плиты по данным измерений температуры определялся показатель «зрелость бетона» (ЗБ) по формуле (3):

$$ЗБ = \int_{\tau_0}^{\tau_к} f(T(\tau))\, d\tau, \quad (3)$$

где: T — температура, °C; τ — время, ч.

- В любой момент времени $\tau_{пi}$, сут, рассчитывалось значение предела прочности твердеющего бетона R_τ на сжатие по формуле (4):

$$R_\tau = R_{28} \cdot \exp\left(k \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{п,28}}{\tau_{пi}}}\right)\right), \quad (4)$$

где: $\tau_п$ — приведенное время, сут, рассчитываемое по формуле (5):

$$\tau_п = \frac{ЗБ}{20 \cdot 24}, \quad (5)$$

где: R_{28} — предел прочности бетона, определенный на поверхности участков в возрасте 28 сут по ГОСТ 22690-2015, п. 7.6.

- Значение коэффициента k = 0,28 в формуле (4) определено по результатам измерения предела прочности бетона в фундаментной плите в возрасте 7 (R_7 = 39,8 МПа) и 28 сут (R_{28} = 47,2 МПа), соответственно приведенное время $\tau_п$ на участке 1, где производилось измерение прочности бетона, составило в 7 сут — 9,8 сут и в 28 сут — 25,6 сут.

- Предел прочности бетона на осевое растяжение в любой момент времени $\tau_{пi}$ рассчитывался по формуле (6):

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

- Величина растягивающего или сжимающего напряжения σ_t в любой момент времени $\tau_{пi}$ рассчитывалась по формуле (7):

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

где: E — модуль упругости бетона, МПа; ε — измеренные датчиками CS-02 значения относительных деформаций.

- Модуль упругости бетона в любой момент времени $\tau_{пі}$ рассчитывался по формуле (8):

$$E = 1000 \cdot \frac{0{,}04 \cdot R_\tau + 57}{1 + \frac{29}{3{,}8 + 0{,}8 \cdot R_\tau}}. \quad (8)$$

- Уровень растягивающих напряжений в любой момент времени $\tau_{пі}$ рассчитывался по формуле (9):

$$u_t = \frac{\sigma_t}{R_t}, \quad (9)$$

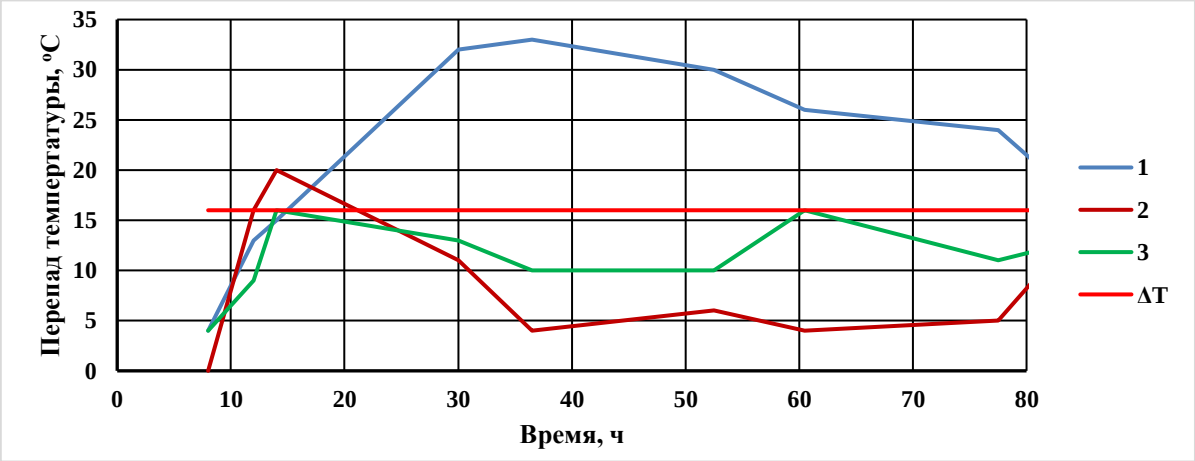
- Уровень сжимающих напряжений в любой момент времени $\tau_{пі}$ по формуле (10):

$$u = \frac{\sigma}{R}. \quad (10)$$

Перепад температуры «центр — поверхность»

На рисунке 4 представлены значения перепада температуры «центр — поверхность» в период наблюдения по трем участкам с различными значениями теплоотдачи с поверхности. Там же приведено предельное допустимое значение перепада ΔT = 16ºC для конструкции с коэффициентом армирования 0,03 по рекомендациям[4]. Согласно [15] предельное значение перепада температуры «центр — поверхность» не должно превышать 20ºC, а согласно [10] эта величина составляет от 16 до 19ºC. Согласно CIRIA C600 перепад температуры «центр — поверхность» зависит от предельной растяжимости бетона ε и коэффициента температурных деформаций бетона α:

$$\Delta T < \frac{3{,}7 \cdot \varepsilon}{\alpha}. \quad (11)$$



1 — неутепленный участок; 2 — участок с 50 мм ППС 13; 3 — участок с 100 мм ППС 13; 4 — допустимый перепад температуры по [4]

Рисунок 4. *Изменение перепада температуры «центр — поверхность» исследованной плиты (разработано авторами)*

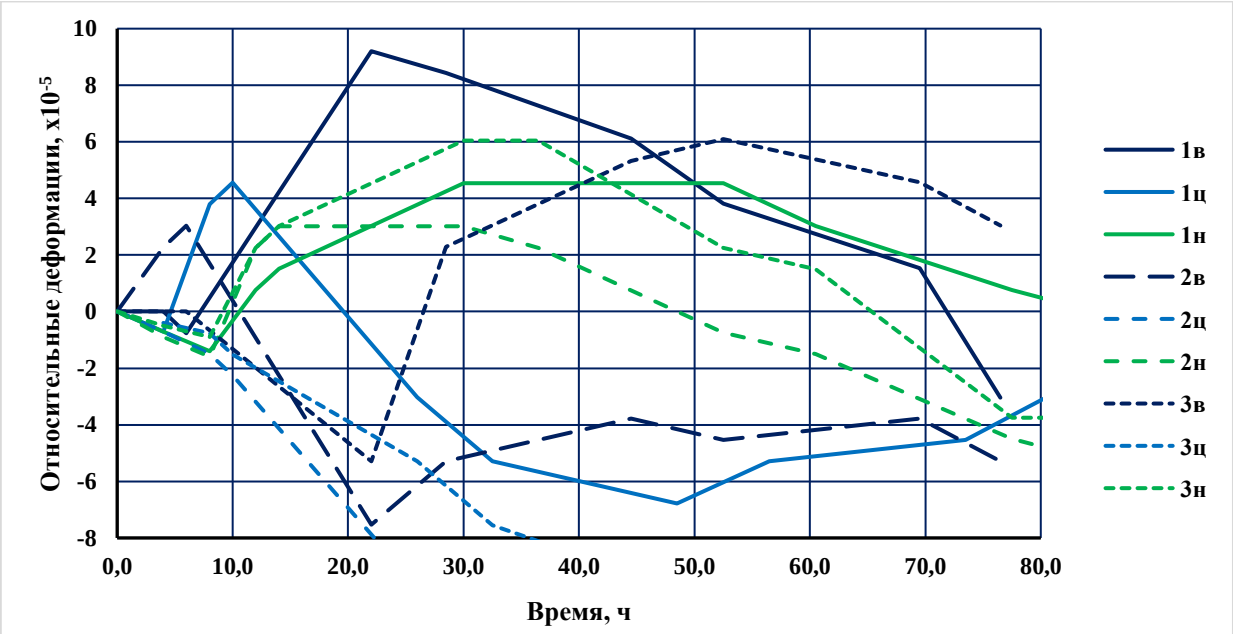
[4] Р НОСТРОЙ 2.6.17-2016 Рекомендации Организация и производство бетонных работ в зимний период. — Москва. — 2015. — 69 с.

В ранний период твердения при $\varepsilon = (5…9)\cdot10^{-5}$ и $\alpha = (10…15)\cdot10^{-6}$ значения ΔT по формуле (10) составляют от 12 до 33°С. Очевидно, что некоторые известные рекомендации по ограничению предельного перепада температуры «центр — поверхность» неоднозначны.

Время достижения максимального значения температуры в центре плиты составило в наших исследованиях от 22 до 44 ч, а на поверхности от 28 до 44 ч. На неутепленном участке перепад температуры «центр — поверхность» превысил предельные значения по рекомендациям[4] уже через 16 ч. На участке с утеплителем 100 мм ППС 13 за весь период наблюдений перепад температуры не превысил 16°С. На участке с утеплителем 50 мм ППС 13 отмечено непродолжительное превышение до 20°С перепада температуры «центр — поверхность» в период от 14 до 15 ч. Следует иметь в виду, что при послойной укладке бетонной смеси оценка перепада температуры «центр — поверхность» носит несколько условный характер, поскольку развитие процесса тепловыделения бетона в слоях протекает не синхронно.

Относительные деформации в теле плиты

На рисунке 5 представлены значения относительных деформаций в центре и на верхней и нижней поверхности исследованной фундаментной плиты по результатам показаний датчиков CS-02 (со знаком «минус» — сжатие).



1, 2, 3 — соответственно участок без утепления, 50 и 100 мм ППС 13; в, ц, н — соответственно верх, центр, низ плиты

Рисунок 5. *Изменение относительных деформаций в центре и на поверхностях исследованной плиты (разработано авторами)*

На участке без утепления поверхности (1) зафиксировано максимальное значение растягивающей деформации в твердеющем бетоне $9{,}2\cdot10^{-5}$. На участке с утеплением 50 мм ППС 13 растягивающие деформации достигли значения $3\cdot10^{-5}$, а на участке с утеплением 100 мм ППС 13 растягивающие деформации достигли значения $6{,}1\cdot10^{-5}$. Расчет по формуле (11) дает предельные значения перепада температуры, представленные в таблице 1 при значениях величин R_t и E, определенных по формулам (3)–(8).

17SAVN323
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 1

Растягивающие деформации и перепады температуры «центр — поверхность»

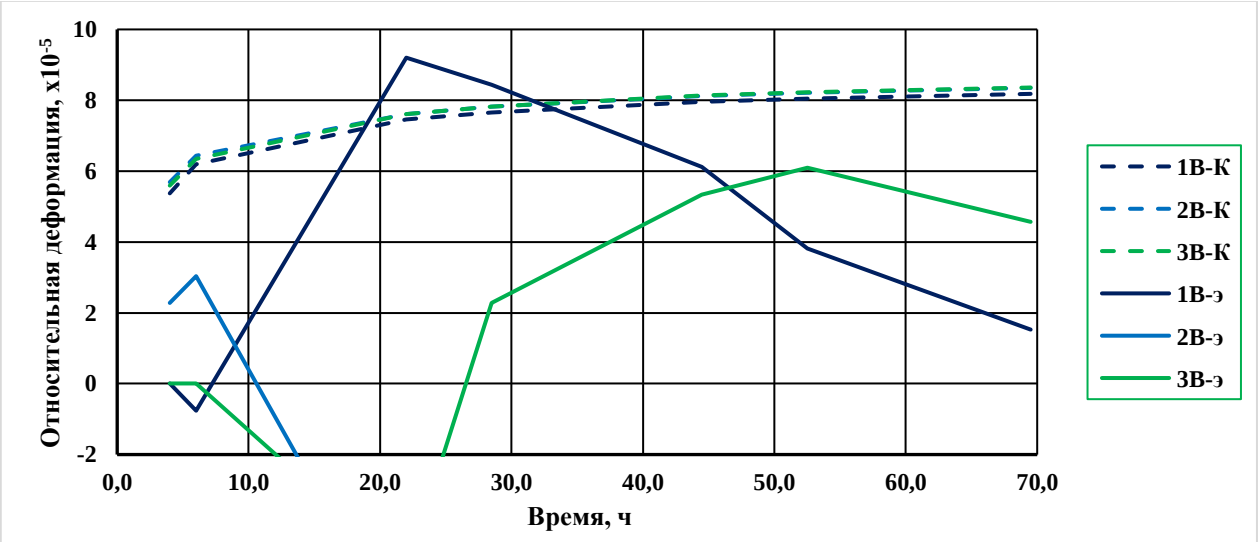
Участок	Величина ε, x10^{-5}	Предельные значения ΔT, °C					ΔT, °C факт
		по ф. (10)		по [14]	по [4]	по [10]	
		α = 10·10^{-6}	α = 15·10^{-6}				
1	9,2	45	30	16	16	16…19	32
2	3,0	40	26				20
3	6,1	50	33				16

По экспериментальным результатам измерений перепада температуры «центр — поверхность» ΔT в исследованной фундаментной плите и расчетно-экспериментальным значениям уровня растягивающих напряжений u(σ_t) получена зависимость:

$$u(\sigma_t) = 0{,}033 \cdot \Delta T, \quad (12)$$

характеризующаяся показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}924$, из которой допустимый перепад температуры «центр — поверхность» составляет 30°C при u(σ_t) = 1 и 22°C при u(σ_t) = 0,75.

Сопоставление представленных в таблице 1 значений ΔT свидетельствует о возможности превышения предельного допустимого перепада температуры «центр — поверхность», но при этом следует учитывать, что между критериями формуле (10) и [15][4] имеет место существенное различие, что, во-первых, предопределяет актуальность дальнейших исследований в этом направлении, а, во-вторых, свидетельствует о невозможности заключения о вероятности трещинообразования только по данным о перепаде температуры «центр — поверхность».



1, 2, 3 — соответственно участок без утепления, 50 и 100 мм ППС 13; в — верх плиты; К — критерий $R_{t,\tau}/E_\tau$; э — экспериментальные значения деформаций

Рисунок 6. *Критерий формулы (14) на поверхности участков исследованной плиты (разработано авторами)*

По экспериментальным результатам измерений относительных растягивающих деформаций ε в исследованной фундаментной плите и расчетно-экспериментальных значений уровня растягивающих напряжений u(σ_t) получена зависимость:

$$u(\sigma_t) = 13560 \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

17SAVN323
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

характеризующаяся показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}986$, из которой допустимое предельное значение относительной деформации растяжения $\varepsilon_{пр}$ составляет $7{,}4 \cdot 10^{-5}$ при $u(\sigma_t) = 1$ и $5{,}5 \cdot 10^{-5}$ при $u(\sigma_t) = 0{,}75$. Согласно [16] в первом приближении величина $\varepsilon_{пр}$ составляет $(7 \ldots 10) \cdot 10^{-5}$.

В качестве критерия трещиностойкости можно рассматривать величину:

$$\frac{R_{t,\tau}}{E_\tau} > \varepsilon, \qquad (14)$$

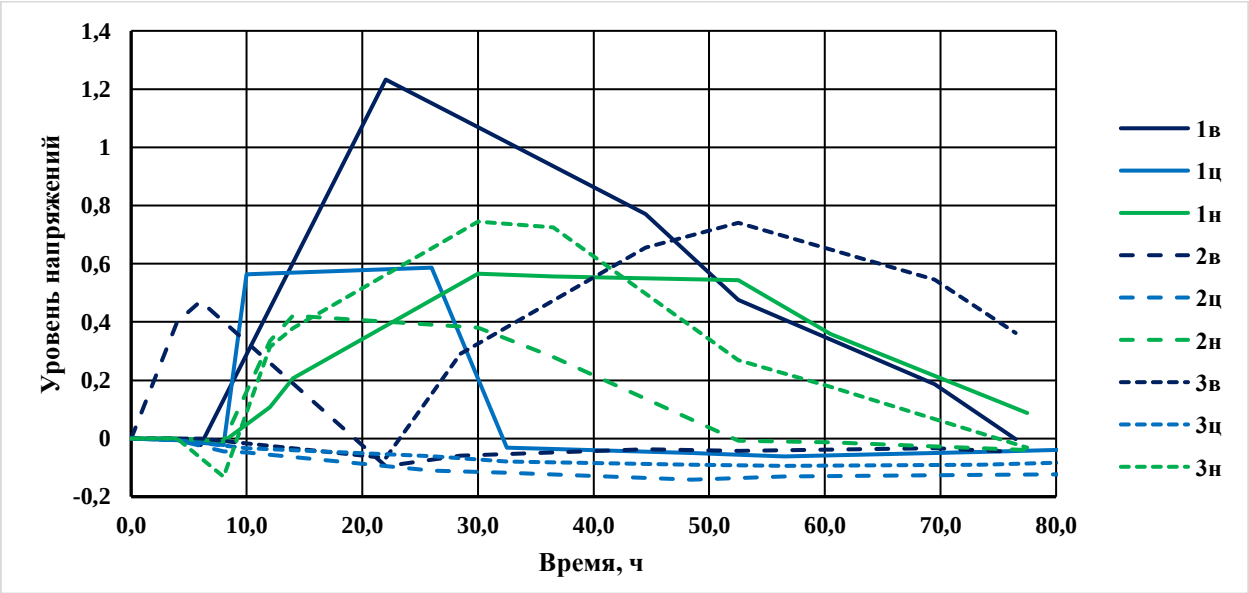
где: $R_{t,\tau}$, E_τ — предел прочности на осевое растяжение и модуль упругости бетона в любой момент времени; ε — фактическая относительная растягивающая деформация в бетоне в любой момент времени.

На рисунок 6 представлены фактические значения относительных растягивающих деформаций на участках 1–3 в сопоставлении с расчетно-экспериментальными значениями критерия $R_{t,\tau}/E_\tau$.

Очевидно, что критерию формулы (14) не соответствует поверхность плиты на участке 1 в период от 19 до 33 ч.

Уровень напряжений в бетоне

На рисунке 7 представлены значения уровня напряжений в центре и на верхней и нижней поверхности исследованной фундаментной плиты, определенные по формулам (3)–(10) (со знаком «минус» — уровень сжимающих напряжений).



1, 2, 3 — соответственно участок без утепления, 50 и 100 мм ППС 13; в, ц, н — соответственно верх, центр, низ плиты

***Рисунок 7.** Изменение уровня растягивающих и сжимающих (со знаком «минус») напряжений в центре и на поверхностях исследованной плиты (разработано авторами)*

Максимальное значение уровня растягивающих напряжений 1,23 зафиксировано на неутепленном участке в период примерно от 19 до 33 ч после завершения бетонирования, что соответствует максимальному значению температуры на этом участке в центре плиты. Результаты моделирования по [12; 14] дают значения уровня растягивающих напряжений для рассматриваемых условий до 1,4, что превышает значения по рисунку 7 в 1,14 раза, что

17SAVN323
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

свидетельствует о достаточно хорошей сходимости результатов моделирования с экспериментом. Максимальная величина растягивающих напряжений по формулам (3)–(8) составила 2,21 МПа, что хорошо согласуется с данными [17], согласно которым на верхней поверхности плиты через 72 ч значение величины растягивающих напряжений составило 2,43 МПа, что сопоставимо, например, с пределом прочности на осевое растяжение бетона класса В25 в проектном возрасте. Для утепленных участков 2 и 3 уровень растягивающих напряжений не превысил значения 0,74, что наглядно иллюстрирует эффективность регулирования температурных градиентов в твердеющих массивных монолитных конструкциях с целью предотвращения раннего трещинообразования посредством регулирования коэффициента теплоотдачи с поверхности. По данным [18] превышение величины растягивающих напряжений над показателем предела прочности бетона на осевое растяжение зафиксировано примерно через 3,5 сут твердения, а по данным [5] величина растягивающих напряжений, равная пределу прочности бетона, была достигнута через 54 ч. Следует отметить, что в нашем случае использовался бетон на быстротвердеющем высокотермичном портландцементе. Таким образом, полученные экспериментальные значения параметров напряженно-деформированного состояния в ранний период твердения массивной фундаментной плиты хорошо согласуются с некоторыми данными других исследователей и результатами моделирования [12; 14], что позволяет сделать вывод о целесообразности применения модели [12; 14] для решения практических задач.

Заключение

Произведена экспериментальная оценка температурных полей и напряженно-деформированного состояния в ранний период твердения массивной железобетонной фундаментной плиты в зависимости от коэффициента теплоотдачи с поверхности. Сопоставление результатов экспериментальных исследований показало хорошее соответствие с результатами численного эксперимента [14] в зависимости от времени перекрытия слоев, температуры среды и бетонной смеси при укладке, класса бетона по прочности на сжатие, кинетики твердения бетона, а также параметров теплоотдачи на границе с окружающей средой. Регулирование теплообмена с окружающей средой посредством утепления поверхности в ранний период твердения массивных монолитных фундаментных плит является эффективным, технологичным и бюджетным приемом для предотвращения раннего трещинообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидюк, А.Н. Эффективные бетоны для современного высотного строительства: монография / А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев. — Москва: ООО "НИПКЦ Восход-А", 2010. — 144 с.
2. Tazawa E., Miyazawa S. Influence of autogenous shrinkage on cracking in high strength concrete // 4 int. Conf. On High strength or High-performance concrete. — Paris, 1996. — pp. 321–329.
3. Farhad Aslani, Shami Nejadi Creep and Shrinkage Self-Compacting Concrete (SCC). Analytical Models // Journal of Civil Engineering and Architecture, 2012. — Volume 6, № 1 (Serial No. 50). — pp. 93–100 URL: https://hdl.handle.net/10453/31901.

[5] 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.

4. Trong-Chuc Nguyen, Tang Van Lam Designing the Composition of Concrete with Mineral Additives and Assessment of the Possibility of Cracking in Cement-Concrete Pavement // Materials Science Forum, 2018. — Vol. 931. — pp. 667–673 DOI: 10.4028/scientific.net/MSF.931.667.

5. Об увеличении сроков перекрытия бетонных слоев / Б.С. Беленький [и др.] // Энергетическое строительство. — 1981. — № 5. — С. 20–21.

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

7. Kuriakose B., Rao B.N., Dodagoudar G.R. Early-age temperature distribution in a massive concrete foundation // Procedia Technology. — 2016. — № 25. — pp. 107–114 DOI: 10.1016/J.PROTCY.2016.08.087.

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 DOI: 10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550.

9. 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 DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_40.

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

11. Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов / Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык, Брянский И.А., Дам Хыу Хын // Вестник МГСУ. — 2018. — № 13(11). — С. 1407–1418 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418.

12. 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: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7691.

13. Kumar Mehta P., Monteiro P.J.M. Concrete, microstructure, properties and materials. — USA: Mc Graw Hill. — 2001. — 239 p. URL: https://matteopro.com/images/materiali-non-convenzionali/Concrete_microstrutture_-_book.pdf.

14. Оценка некоторых методик для расчета температурных напряжений при бетонировании массивных железобетонных фундаментных плит / Г.В. Несветаев, А.С. Чепурненко, Ю.И. Корянова, Д.П. Сухин // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 7(91). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49408200_93958566.pdf.

15. Rahimi, A. Thermal and structural analysis of roller compacted concrete (RCC) dams by finite element code / A. Rahimi, J. Noorzaei // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. — 2011. — Vol. 5(12). — Pp. 2761–2767.

16. Анискин, Н.А. Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах / Н.А. Анискин, Н. Чонг Чык // Вестник МГСУ. — 2020. — Т. 15, № 3. — С. 380–398 DOI 10.22227/1997-0935.2020.3.380-398.

17. Стручкова А.Я., Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шайбакова А.А. Тепловыделение цемента и расчеты трещиностойкости бетонных массивов // Инженерно-строительный журнал. — 2018. — № 2(78). — С. 128–135 doi: 10.18720/MCE.78.10.

18. 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.

Nesvetaev Grigory Vasil′evich
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: nesgrin@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4153-1046
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=394531
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57194440967

Koryanova Yulia Igorevna
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: koryanova.yi@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2341-9811
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=747733
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Koryanova-Yulia
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57196034514

Sukhin Dmitriy Petrovich
LLS «Don-Kuban Stroy», Rostov-on-Don, Russia
E-mail: 161dks@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5515-6462
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1195780

Experimental study of the stress-strain state of a massive reinforced concrete foundation slab in the early period of hardening

Abstract. The results of experimental studies of temperature changes and relative deformations in the center and on the surface of a massive monolithic reinforced concrete foundation slab in the early period of hardening, depending on the conditions of heat exchange with the environment, are presented. Calculation-experimental method according to the developed algorithm, based on data on the maturity of concrete and average statistical dependencies between strength and deformation indicators, the values of the level of temperature-shrinkage tensile stresses were determined. The analysis of some criteria for the probability of early cracking of massive monolithic reinforced concrete structures is carried out. The insufficiency of taking into account only the temperature difference «center — surface» for assessing the probability of early cracking is substantiated. It is shown that when using the ratio of the axial tensile strength to the elastic modulus of concrete in the non-insulated area with the maximum value of the «center-to-surface» temperature drop as a criterion for crack resistance, the experimentally measured value of tensile strains exceeded the value of the criterion. In the same area, the maximum value of tensile stresses was recorded, which exceeded the axial tensile strength of concrete. Comparison of the results of experimental studies showed good agreement with the results of a previously implemented numerical experiment to assess the influence on the magnitude of the level of tensile stresses on the surface of the foundation slab of such factors as the overlapping time of the layers, the temperature of the environment and the concrete mixture during laying, the class of concrete in terms of compressive strength, the kinetics of concrete hardening , as well as heat transfer parameters at the boundary with the environment. The effectiveness of controlling the heat transfer coefficient from the surface to reduce the level of tensile stresses and the likelihood of early cracking by means of a heat-insulating coating has been confirmed.

Keywords: massive monolithic reinforced concrete structure; stress-strain state; foundation slab; stress level; temperature difference; relative deformation; heat transfer coefficient