

DOI: 10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550

^{1,*}Макеева А.В., ¹Семенов К.В., ¹Макеев А.А., ¹Амелина А.В.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

*E-mail: nicealexa@mail.ru

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАССИВНЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация. Бетон – основополагающий материал современного строительства вследствие его надежности, способности твердеть на воздухе и под водой, возможности возводить конструкции любой формы и размеров. В частности, его используют при возведении ответственных сооружений и их частей: атомных станций, крупных гидротехнических сооружений, мостов, массивных фундаментов многоэтажных зданий и т.д. Данная работа посвящена актуальной задаче в области строительства зданий и сооружений, имеющих высокий уровень ответственности, исследованию термической трещиностойкости массивных бетонных конструкций с учетом температурных воздействий в строительный период. Проведены расчеты термической трещиностойкости фундаментной плиты реакторного отделения ЛАЭС-2 при непрерывном бетонировании одним блоком на всю высоту. Выявлено, что использование наиболее простой и получившей широкое распространение расчетной модели, не учитывающей колебания температуры воздуха в строительный период, приводит к существенному занижению толщины поверхностной теплоизоляции, оптимальной с точки зрения обеспечения термической трещиностойкости массивной бетонной конструкции.

Ключевые слова: термическая трещиностойкость, массивные бетонные конструкции, термонапряженное состояние, строительный период, регулирование температурного режима, колебания температуры воздуха.

Введение. Массивные бетонные конструкции наибольшее распространение имеют в гидротехническом строительстве, но достаточно часто находят применение и в других строительных отраслях. Из опыта строительства первых массивных бетонных и железобетонных конструкций обнаружили многочисленные образования трещин. Например, плотина «Сент-Френсис» (США) разрушилась в 1928 году, и считается одним из самых известных случаев разрушения плотин. Причиной разрушения стало образование большого количества трещин и подвижки грунтов в основании. Параметры температурного трещинообразования явным образом были связаны с воздействием температуры в виде колебаний температуры наружного воздуха и с экзотермическими разогревами бетона [1].

При бетонировании, по причине экзотермической реакции твердения цементного теста, возрастает эффект саморазогрева [2]. В массивных конструкциях, в отличие от тонкостенных, охлаждаются только поверхностные слои, в то время как в центре блока бетонирования происходит существенный нагрев и расширение. В итоге, в поверхностных слоях конструкции возникают растягивающие напряжения, которые приводят к образованию температурных трещин [3–5]. Чем больше разница температур между блоком и окружающей средой, тем больший температурный перепад возникает между ядром массива и

его гранями. Трещины опасны, поскольку способствуют потере прочности и жесткости конструкции, ускорению коррозии арматуры и нарушению герметичности, что недопустимо в гидротехнических сооружениях и в ответственных частях сооружений, таких как фундаменты [4]. Без назначения специальных мероприятий по регулированию температурного режима твердения бетонной смеси, трещинообразования избежать не удастся [6]. Температурные воздействия строительного периода определяются с учетом экзотермии и других условий твердения бетона, включая конструктивные и технологические мероприятия по регулированию температурного режима конструкции, температуры наружного воздуха и т.д.

Моделированию изменения окружающей температуры в течение некоторого периода (сутки, год, месяц) и оценке влияния данного колебания посвящены работы как отечественных, так и зарубежных авторов. Например, в статье [7] на основе полученных экспериментальных результатов исследования впервые можно было сделать прямые заявления об условиях деформации, возникающих в асфальтовом базовом слое из-за температуры.

В расчетах термонапряженного состояния и термической трещиностойкости массивных бетонных конструкций в строительный период температура воздуха наравне с исходными данными о геометрической форме и характеристиками бетона является основополагающим фактором [1]:

- чем больше разница температур между блоком бетонирования и окружающей средой, тем больший температурный перепад возникает между ядром блока и его гранями, что приводит к развитию напряжений в конструкции.

- влияние температуры воздуха на процесс *тепловыделения бетона*: лабораторные и натурные исследования показали, что чем выше температура твердения, тем более интенсивно происходит процесс тепловыделения.

- влияние температуры воздуха на рост *модуля деформации бетона*: при повышении температуры увеличивается скорость нарастания модуля деформаций, т. е. процесс старения происходит более интенсивно.

- влияние температуры воздуха на *ползучесть бетона*: повышение температуры влияет на скорость деформаций ползучести и ее предельные значения.

Ранее в исследованиях распределения температурных полей и термонапряженного состояния задавалась некоторая постоянная, среднемесячная, температура воздуха [8–12]. Однако существует суточный ход. Учет влияния переменной температуры воздуха затруднителен, т.к. представляет собой сложный динамический процесс, содержащий как явные, описываемые математическими формулами, так и случайные составляющие [13].

Поскольку большинство используемых в настоящее время методик и программных комплексов этого не учитывают, актуальной задачей является усовершенствование методики расчета термической трещиностойкости массивных бетонных конструкций зданий и сооружений с целью повышения их надежности.

Цель исследования – оценка влияния колебаний температуры окружающего воздуха в расчетах термической трещиностойкости массивных бетонных конструкций в строительный период и обоснование необходимости подобного учета.

Гипотеза: нестационарные температурные поля в расчетах конструкций при расчете по постоянной температуре воздуха и при учете ее изменений в течение суток различны, что сказывается на трещиностойкости и подлежит учету при обосновании бетонных конструкций и технологии бетонирования.

Методология. Теоретической основой работы послужили исследования Г.Н. Маслова, Н.Х. Арутюняна, И.Д. Запорожца, А.В. Белова, П.И. Васильева, Л.П. Трапезникова, С.М. Гиндзбурга, Н.А. Малинина, Ю.И. Кононова, Ю.Г. Барабанщикова, К.В. Семенова и других в области математического моделирования температурного режима и термонапряженного состояния массивных бетонных конструкций.

Практическая часть работы выполнялась на модели реально существующего объекта. Параметры тепловыделения, теплофизические и деформативные характеристики бетона приняты на основании результатов экспериментальных исследований, полученных в лаборатории "Политех-СКИМ-Тест".

Решение одномерной задачи было реализовано в программе «TERM» (алгоритмический язык Basic 6.0), предназначенной для расчетов термонапряженного состояния бетонных массивов в процессе их возведения. Программа разработана на кафедре «Строительная механика и строительные конструкции» СПбПУ Петра Великого. В программе можно варьировать исходные данные: характеристики бетона, граничные условия и т.д.

Процесс тепловыделения описывается уравнением согласно теории И.Д. Запорожца, с учетом переменных температур, имеющим вид [14]:

$$Q(\tau) = Q_{max} \left\{ 1 - \left[1 + A_{20} \int_0^t F_Q [T(\tau) d\tau] \right]^{-\frac{1}{m-1}} \right\}, \quad (1)$$

где Q_{max} – максимально возможное тепловыделение на 1 м³ бетона, Дж; A_{20} – коэффициент темпа роста тепловыделения при $T=20$ °С; t – продолжительность процесса тепловыделения, ч; m – порядок реакции.

Порядок процесса тепловыделения, Q_{max} и A_{20} определяются экспериментально.

Учет влияния температуры твердения на тепловыделение бетона осуществляется с помощью *гипотезы приведенного времени*, учитывающей всю «температурную» предысторию и позволяющей определить тепловыделение к любому моменту времени и любом температурном режиме по известной кривой экзотермического тепловыделения бетона при температуре 20 °С [14]:

$$t_{пр} = \int_0^t F_Q [T(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

где $T(\tau)$ – температура твердения бетона, °С; F_Q – температурная функция.

Учет влияния переменной температуры твердения на модуль деформаций может быть произведен по зависимости, предложенной П.И. Васильевым и Ю.И. Кононовым [1]:

$$E(t) = E_{пред} \left(1 - 0.5\alpha_1 t_{пр} - 0.5\alpha_2 t_{пр}^p \right), \quad (3)$$

где α_1 , α_2 , p – эмпирические коэффициенты, $t_{пр}$ – «приведенное» время.

Влияние температурных условий на величину деформаций ползучести можно учесть, заменяя действительное время «приведенным» [15]:

$$t_{пр} = \int_0^t F_E [T(\tau)] d\tau, \quad (4)$$

Температурную функцию F_E предлагается принимать в виде:

$$F_E [T(\tau)] = \left[\frac{T(\tau)+30}{50} \right]^{3.2}, \quad (5)$$

Объект исследования – фундаментная плита реакторного отделения Ленинградской атомной

электростанции – 2 (ЛАЭС-2), которая расположена в юго-восточной части промышленной зоны г. Сосновый бор; высокая ответственность которой, определяемая масштабом возможных последствий выхода из строя несущей конструкции, диктует необходимость расчета термонапряженного состояния в строительный период.

Фундаментная плита реакторного отделения ЛАЭС-2 в плане представляет круг диаметром 52 м, толщиной 2 м. Плита опирается на слой бетон-

ной подготовки по грунтовому основанию. Бетонирование фундаментной плиты осуществляется на всю высоту без разрезки на блоки по вертикали. Для того чтобы расширить работу, расчеты также велись для плит толщиной 1 м и 3 м. Параметры фундамента и последовательность укладки слоев представлены на рис.1. Прочностные и деформативные характеристики бетона приняты согласно СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений».

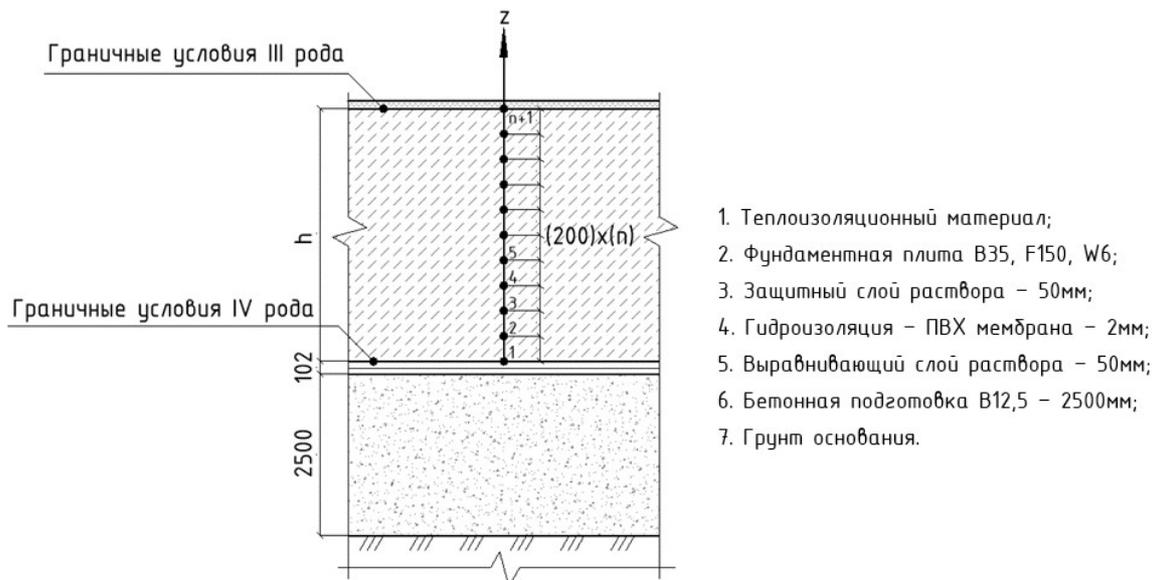


Рис. 1. Расчетная схема

Как видно из рисунка, плита делится на n равных частей ($n+1$) узлами. Эти узлы образуют сетку метода конечных разностей (МКР), в которых программа TERM определяет температуру, напряжение и начальный модуль упругости в зависимости от времени. Интервал определения температуры по времени – 1 час, напряжений – 1 сутки.

Исследования выполняются по среднемесячной (А), среднесуточной (Б) и почасовой (В) температурам воздуха согласно данным Федеральной Службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для города Санкт-Петербург. Вид моделей приведен на рис. 2.

В качестве исследуемого метода борьбы с температурными трещинами и влияния на термонапряженное состояние массива фундаментной плиты для достижения целей работы было выбрано укрытие поверхности бетона теплоизоляционным материалом. В качестве теплоизоляционного материала рассматривается экструдированный пенополистирол различной толщины с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,033 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

Учет в программе наличия теплоизоляции на поверхности тела и ее влияние на температурное состояние реализуется путём задания приведённого коэффициента теплоотдачи с поверхности:

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + R}, \quad (6)$$

где β – коэффициент теплоотдачи с открытой поверхности бетона в наружный воздух, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; R – термическое сопротивление теплоизоляционного материала, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Основная часть. Сопоставление расчетных моделей выполнялось по результатам расчета температурных полей и температурной трещиностойкости, т.к. в общем случае это можно рассматривать как отдельные задачи. Исследования термической трещиностойкости с учетом и без учета влияния колебаний температуры воздуха для каждой толщины фундаментной плиты были произведены с помощью программы «TERM». При сравнении рассмотренных моделей по температурным полям использовались: максимальный подъем температуры в центре T_{max_c} , на верхней границе T_{max_b} и соответствующий им момент времени в сутках. При оценке трещиностойкости использовался деформационный критерий, предложенный П.И. Васильевым и предусмотренный в СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений».

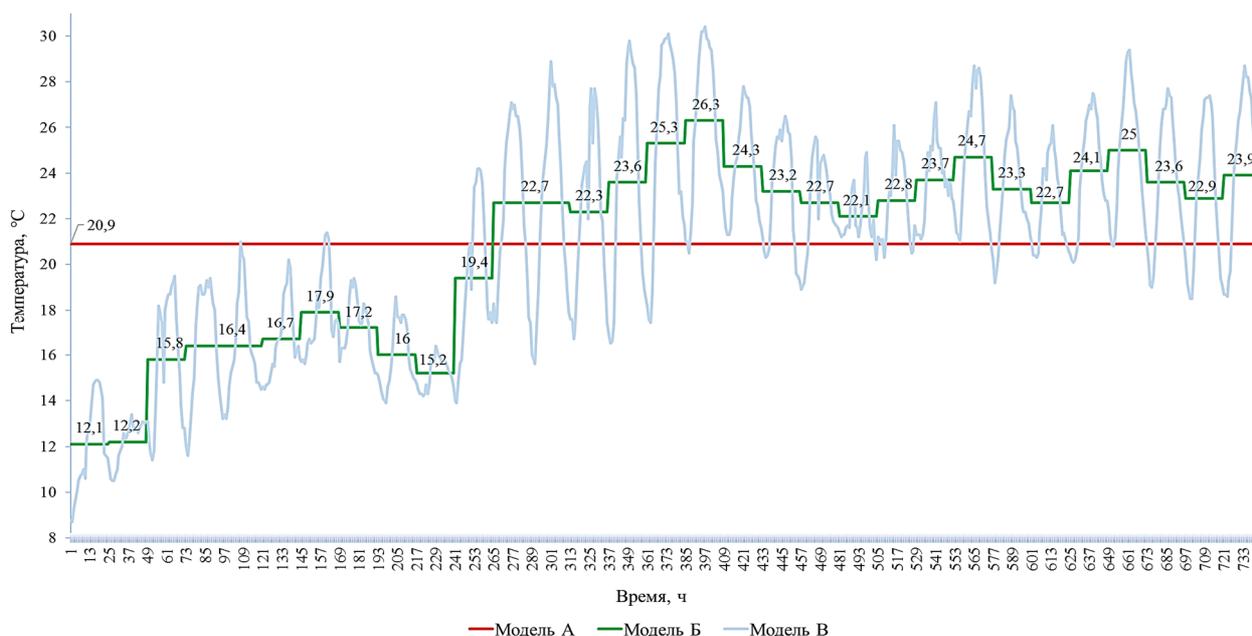


Рис. 2. Расчетные модели

Температурные поля

Сравнение основных характеристик температурных полей, полученных для моделей, показывает:

1. Расчеты с учетом колебаний температуры воздуха (по среднесуточной и почасовой температурам) дают отличную картину распределения температур на верхней поверхности плиты по сравнению с расчетом при постоянной температуре воздуха (среднемесячной).

2. Изменение температуры в центре плиты для всех расчетных моделей носит одинаковый характер: существенный нагрев (свыше 60 °С для плиты толщиной 2 метра) в первые несколько суток (трое для плиты толщиной 2 метра) и затем медленный спад.

График изменения температур для плиты высотой 2 метра приведен на рис. 3–5.

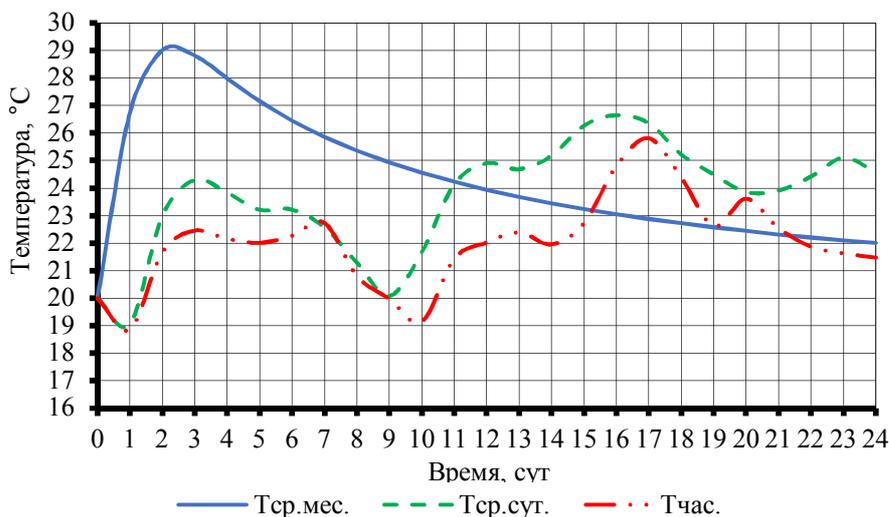


Рис. 3. Изменение температуры на верхней поверхности плиты высотой 2 метра

3. Для всех расчетных моделей, в зависимости от высоты плиты, максимальная температура в центре массива наблюдается в один и тот же момент времени. Разность температур при расчете по среднемесячной температуре несколько

ниже, чем при расчетах по среднесуточной и почасовой: расхождение в среднем составляет 8,2 % и 13,3 % соответственно. График изменения разности температур (центр-верх) в зависимости от высоты плиты приведён на рис. 6.

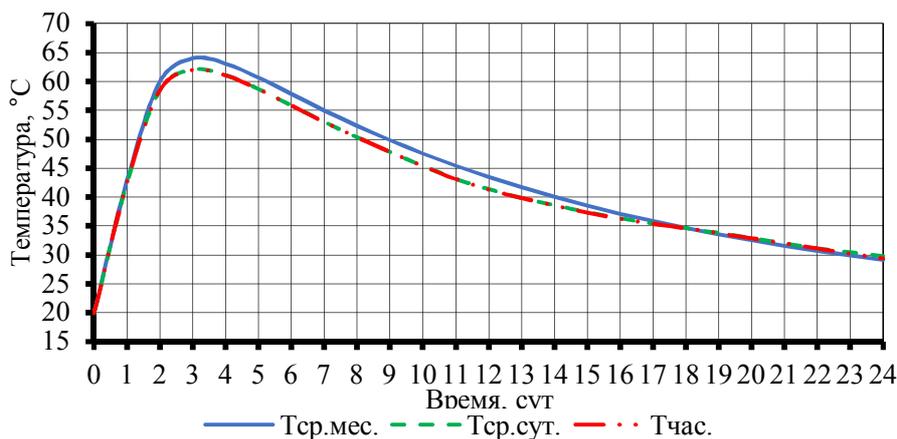


Рис. 4. Изменение температуры в центре плиты высотой 2 метра

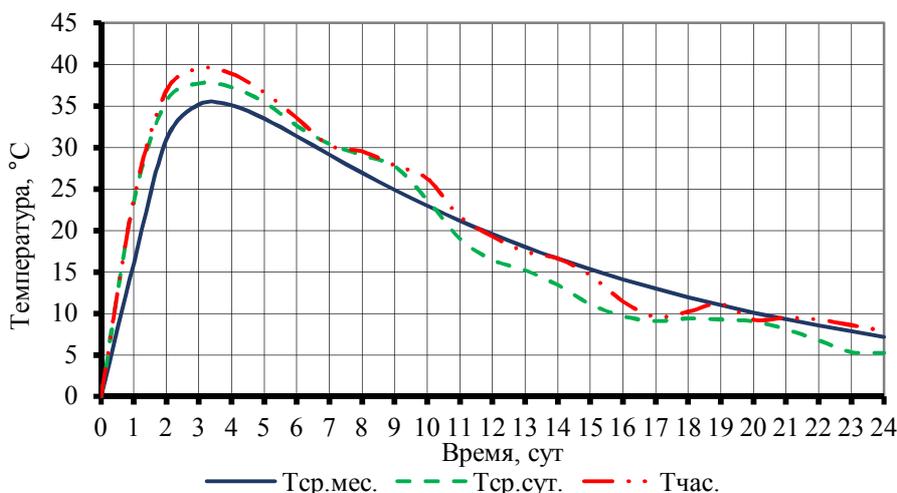


Рис. 5. График изменения разности температур (центр-верх) для плиты высотой 2 м

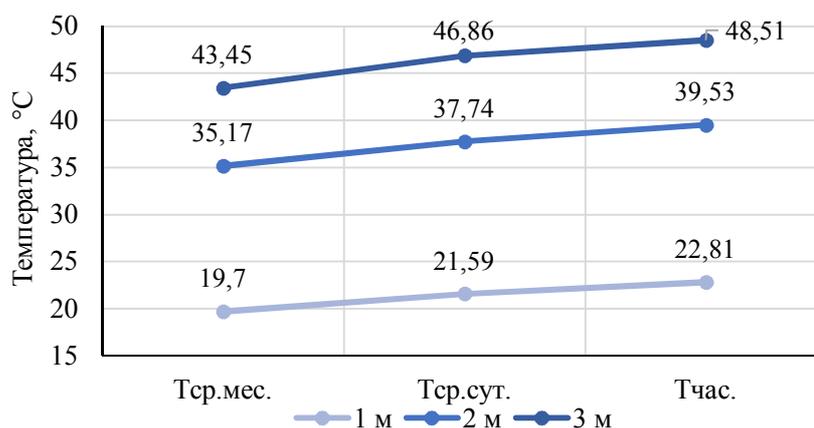


Рис. 6. График изменения разности температур (центр-верх) в зависимости от высоты плиты

Термическая трещиностойкость

Результаты расчета температурной трещиностойкости показывают, что на первые сутки после укладки бетонной смеси критерий трещиностойкости не выполняется для всех рассмотренных случаев. В общем случае, невыполнение критерия наблюдается с 1-е по 5-е сутки на поверхности для плиты толщиной 2 метра, с 1-е по 3 сутки – для плиты толщиной 1 метр, с 1-е по 7-е сутки – для плиты толщиной 3 метра. Процент

невыполнения (дельта) зависит от времени и при расчете по среднемесячной температуре воздуха значительно занижен по сравнению с расчетами с учетом колебаний температуры воздуха (см. табл. 1).

Наглядно сопоставление моделей видно на графике изменения деформаций (рис. 7): значения относительных деформаций в расчетах при почасовой температуре воздуха наибольшие.

Таблица 1

Результаты расчета термической трещиностойкости

Толщина плиты, м	Расчет при среднемесячной температуре воздуха $T_{ср.мес}$			Расчет при среднесуточной температуре воздуха $T_{ср.сут}$			Расчет при почасовой температуре воздуха $T_{час}$		
	Узел	Δ , %	t, сут	Узел	Δ , %	t, сут	Узел	Δ , %	t, сут
1	6	49,9	1	6	67,4	1	6	67,6	1
	6	29,4	2	6	27,4	2	6	35,2	2
	6	1,3	3	-	-	-	-	-	-
2	10	12,3	1	10	40,3	1	10	38,8	1
	11	66,3	1	11	78,8	1	11	79,0	1
	10	18,4	2	10	30,6	2	10	29,7	2
	11	61,9	2	11	66,8	2	11	69,0	2
	10	21,8	3	10	19,0	3	10	18,0	3
	11	58,5	3	11	58,6	3	11	62,4	3
	10	10,5	4	-	-	-	-	-	-
	11	45,0	4	11	40,9	4	11	47,0	4
	11	18,4	5	11	3,4	5	11	12,5	5
3	15	27,9	1	15	51,8	1	15	51,0	1
	16	68,8	1	16	81,0	1	16	81,2	1
	15	38,2	2	15	48,2	2	15	47,9	2
	16	67,8	2	16	72,9	2	16	74,5	2
	15	44,4	3	15	44,5	3	15	44,2	3
	16	67,4	3	16	68,8	3	16	71,1	3
	14	1,6	4	-	-	-	-	-	-
	15	41,3	4	15	35,2	4	15	35,2	4
	16	61,2	4	16	60,3	4	16	63,3	4
	14	0,4	5	-	-	-	-	-	-
	15	34,3	5	15	24,4	5	15	25,5	5
	16	50,9	5	16	47,0	5	16	50,1	5
	15	24,0	6	15	9,8	6	15	10,6	6
	16	35,9	6	16	22,4	6	16	25,6	6
	15	11,2	7	-	-	-	-	-	-
	16	14,4	7	-	-	-	-	-	-

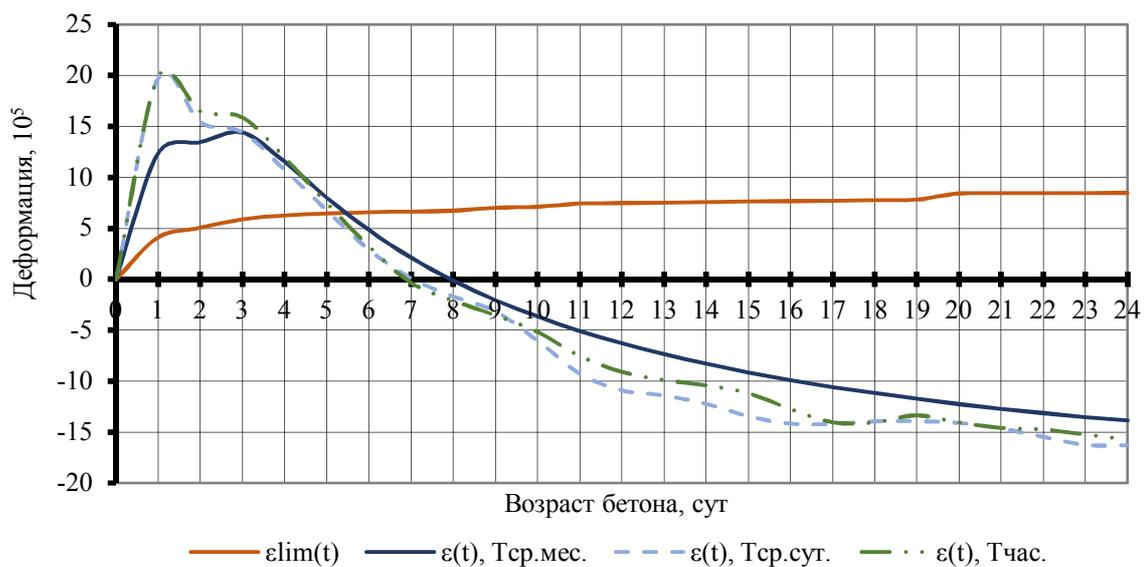


Рис. 7. График изменения относительных деформаций ϵ и предельной растяжимости ϵ_{lim} для плиты высотой 2 м

Для предотвращения трещинообразования были подобраны минимальные безопасные толщины поверхностной теплоизоляции из пенополистирола. На рис. 8. представлено изменение

минимальных безопасных (в смысле образования трещин) толщин поверхностной теплоизоляции в зависимости от толщины фундаментной плиты для расчетных моделей «А» – «В».

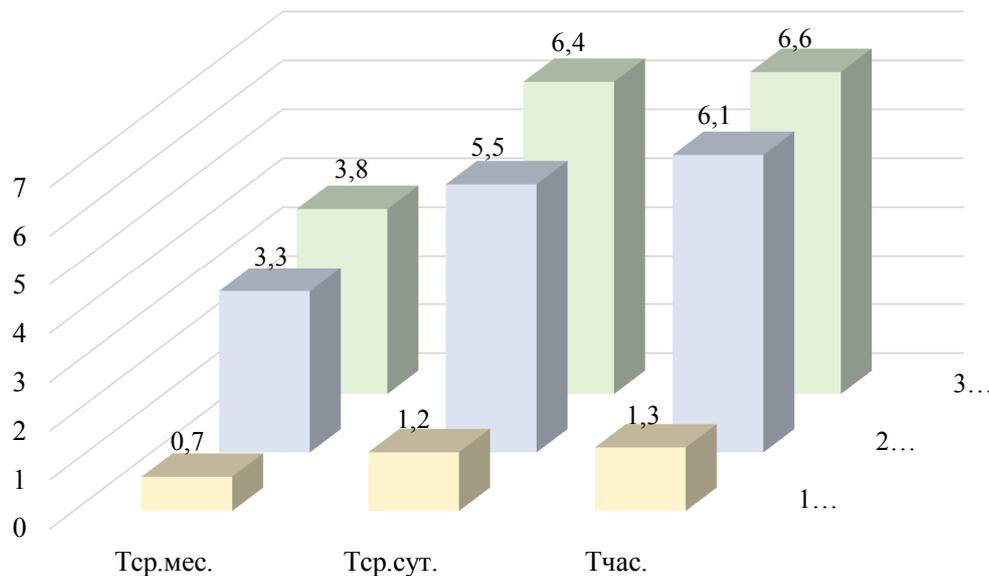


Рис. 8. Минимальная необходимая толщина теплоизоляции в зависимости от толщины плиты для расчетных моделей «А» – «В», см

Анализ гистограммы позволяет сделать вывод о том, что не учет колебаний температуры воздуха может привести к существенному занижению требуемой толщины теплоизоляции. Процент расхождения результатов не значительно зависит от изменения толщины плиты и в среднем составляет от 68,8% (при расчете по среднесуточной температуре) до 81,4% (при расчете по почасовой температуре).

Таким образом, требуемая толщина теплоизоляции при расчете по среднемесячной температуре воздуха может быть занижена в 1,8 раза и термическая трещностойкость может быть не обеспечена даже с учетом коэффициента запаса, вводящегося в расчеты.

Выводы. На основании анализа результатов расчетных исследований, выполненных в рамках численного эксперимента для одиночного блока, установлено, что процент невыполнения критерия трещностойкости при расчете по среднемесячной температуре воздуха значительно занижен по сравнению с расчетами с учетом колебаний температуры воздуха. Это может привести, в свою очередь, к неоправданному смягчению технологического режима бетонирования и проявлению вследствие этого непрогнозируемых температурных трещин. Таким образом, использование наиболее простой и получившей широкое распространение расчетной модели «А», не учитывающей колебания температуры воздуха в

строительный период, недопустимо при обосновании массивных бетонных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стручкова А.Я. Термическая трещностойкость массивных фундаментных конструкций в строительный период: дис.... маг. СПбПУ. СПб., 2018. 92 с.
2. Adilson Schackowa, Carmeane Effting, Itamar R. Gomes, Isabeli Z. Patrui, Felipe Vicenzi, Camila Kramel. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration // Applied Thermal Engineering. 25 June 2016. Pp. 1362–1369.
3. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G. Fracture analysis of reinforced concrete bridge structures with account of concrete cracking under steel corrosion // Advanced Materials Research. 2014. vol. 831. Pp. 364–369.
4. Bennet Kuriakose, B. Nageswara Rao, Doda-goudar G.R. Early-age Temperature Distribution in a Massive Concrete Foundation // Procedia Technology. 2015. Vol. 25. Pp. 107–114.
5. Колосова Г.С., Лалин В.В., Колосова А.В. Влияние строительных швов и трещин на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5. С. 76–85.
6. Орехов В.Г., Толстиков В.В. Напряженно-деформированное состояние бетонной плотины Канкунского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2012. №2. С. 34–42.

7. Otto F., Pengfei L., Zeyu Zhang, Wang D., Oeser M. Influence of temperature on the cracking behavior of asphalt base courses with structural weaknesses // International Journal of Transportation Science and Technology. 2018. Vol. 7, Iss. 3. Pp. 208-216.

8. Гинзбург С.М., Корсакова Л.В., Павленко Н.В. Температурный режим и термонапряженное состояние плотин из укатанного бетона в период их возведения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2007. Т. 249. С. 17–24.

9. Стручкова А.Я., Семенов К.В. Термическая трещиностойкость массивных железобетонных конструкций в строительный период // Alfabuild. 2017. №2 (2). С. 31–33.

10. Семенов К.В., Константинов И.А., Савченко А.В., Кокорева К.А., Нестеров А.А. Эффект температурного воздействия в расчетах термонапряженного состояния дискретно наращиваемых бетонных тел // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №5 (32). С. 18–28.

11. Shengxing W., Donghui H. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis // Journal of Thermal Analysis

and Calorimetry. 2011. Vol. 105. Issue 1. Pp. 171–186.

12. Bushmanova A.V., Kharchenko D.K., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Korovina V.K., Dernakova A.V. Thermal cracking resistance in massive steel-reinforced concrete structures // Magazine of Civil Engineering. 2018. №. 3. Pp. 45–53.

13. Бузунова М.У., Кузнецов Б.Ф., Дрянов О.А. Имитационная модель изменения температуры окружающей среды с восстановлением суточного хода // ВЕСТНИК ИрГСХА. 2015. № 69. С. 96–102.

14. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. М.: Стройиздат, 1966. 316 с.

15. Korotchenko I.A., Ivanov E.N., Manovitsky S.S., Borisova V.A., Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Deformation of concrete creep in the thermal stress state calculation of massive concrete and reinforced concrete structures // Magazine of Civil Engineering. 2017. №. 1. Pp. 56–63.

Информация об авторах

Макеева Александра Васильевна, магистрант. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Семенов Кирилл Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика и строительные конструкции» Инженерно-строительного института. E-mail: kvsemenov@bk.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Макеев Артём Андреевич, магистрант. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Амелина Александра Вячеславовна, магистрант. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила в апреле 2019 г.

© Макеева А.В., Семенов К.В., Макеев А.А., Амелина А.В., 2019

^{1,*}Makeeva A.V., ¹Semenov K.V., ¹Makeev A.A., ¹Amelina A.V.

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya 29

*E-mail: nicealexa@mail.ru

CRACK RESISTANCE OF MASSIVE CONCRETE STRUCTURES DURING THE BUILDING PERIOD TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE EFFECTS

Abstract. Concrete is a fundamental material of modern construction due to its reliability, the ability to harden in air and under water, the ability to build structures of any shape and sizes. In particular, it is used in the construction of advanced structures and their parts: nuclear power plants, large hydraulic structures, bridges, massive foundations of multi-storey buildings, etc. This paper is devoted to relevant objective in the field of construction of buildings and structures with a high level of responsibility, the study of thermal crack resistance of massive concrete structures, taking into account the temperature effects during the building period. The calculations are given of the thermal crack resistance of the foundation plate of the reactor department of Leningrad NPP-2 under continuous concreting with one block at full height. It is highlighted that the use of the simplest calculation model, which does not consider fluctuations in air temperature during the

building period, leads to a significant error of the surface insulation thickness that is optimal from the point of view of providing the thermal crack resistance of a massive concrete structure.

Keywords: thermal cracking resistance, massive concrete structures, thermal stressed state, building period, adjustment of the thermal regime, air temperature fluctuation.

REFERENCES

1. Struchkova A.Ya. Thermal crack resistance of massive foundation structures during the building period [Termicheskaya treschinostoykost' massivnyh fundamentnyh konstrukciy v stroitel'nyy period]: dis.... Master SPbPU. SPb, 2018. 92 p. (rus)
2. Adilson Schackowa, Carneane Efting, Itamar R. Gomes, Isabeli Z. Patrui, Felipe Vicenzi, Camila Kramel. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration. *Applied Thermal Engineering*. 2016. 25 June. Pp. 1362–1369.
3. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G. Fracture analysis of reinforced concrete bridge structures with account of concrete cracking under steel corrosion. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 831. Pp. 364–369.
4. Bennet Kuriakose, B. Nageswara Rao, Dodagoudar G.R. Early-age Temperature Distribution in a Massive Concrete Foundation. *Procedia Technology*. 2015. Vol. 25. Pp. 107–114.
5. Kolosova G.S., Lalin V.V., Kolosova A.V., Influence of construction joints and cracks on the stress-strain state of arch-gravity dam [Vliyaniye stroitel'nyh shvov i treschin na napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye arochno-gravitatsionnoy plotiny]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 5. Pp. 76–85. (rus)
6. Orekhov V.G., Tolstikov V.V. Stress-strain state of the concrete dam at the kankunskii hydroproject [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye betonnoy plotiny Kankunskogo gidrouzla]. *Power Technology and Engineering*. 2012. No. 2. Pp. 34–42. (rus)
7. Otto F., Pengfei L., Zeyu Zhang, Wang D., Oeser M. Influence of temperature on the cracking behavior of asphalt base courses with structural weaknesses. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2018. Vol. 7. Is. 3. Pp. 208–216.
8. Ginzburg S.M., Korsakova L.V., Pavlenko N.V. Thermal regime and thermo-stresses state of rolled concrete dams during construction [Temperaturnyy rezhim i termonapryazhennoe sostoyaniye plotin iz ukatannogo betona v period ih vozvedeniya]. *Bulletin of VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 2007. Vol. 249. Pp. 17–24. (rus)
9. Struchkova A.Y., Semenov K.V., Thermal cracking resistance in massive concrete structures in the building period [Termicheskaya treschinostoykost' massivnyh zhelezobetonnyh konstrukciy v stroitel'nyy period]. *Alfabuild*, 2017. No. 2 (2). Pp. 31–33. (rus)
10. Semenov K.V., Konstantinov I.A., Savchenko A.V., Kokoreva K.A., Nesterov A.A. The effect of temperature influence in calculations of a thermostressed state of discretely increased concrete bodies [Effekt temperaturnogo vozdeystviya v raschetah termonapryazhennogo sostoyaniya diskretno naraschivaemyh betonnyh tel]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. 5(32). Pp. 18–28. (rus)
11. Shengxing W., Donghui H. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011. Vol. 105. Is. 1. Pp. 171–186.
12. Bushmanova A.V., Kharchenko D.K., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Korovina V.K., Dernakova A.V. Thermal cracking resistance in massive steel-reinforced concrete structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 3. Pp. 45–53.
13. Buzunova M.U., Kuznetsov B.F., Dryanov O.A. Simulation model of temperature changing of environment with recovery of diurnal course [Imitatsionnaya model' izmeneniya temperatury okruzhayushey sredy s vosstanovleniem sutochnogo hoda]. *Scientific-Practical journal Vestnik IrGSHA*. 2015. No. 69. Pp. 96–102. (rus)
14. Zaporozhets I.D., Okorokov S.D., Pariyskiy A.A. Heat Liberation by Concrete [Teplovydeleniye betona]. Leningrad-Moscow: Stroyizdat. 1966, 316 p. (rus)
15. Korotchenko I.A., Ivanov E.N., Manovitsky S.S., Borisova V.A., Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Deformation of concrete creep in the thermal stress state calculation of massive concrete and reinforced concrete structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 1. Pp. 56–63.

Information about the authors

Makeeva, Aleksandra V. Master student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, Polytechnicheskaya 29, 195251, Saint Petersburg.

Semenov, Kirill V. PhD, Assistant professor. E-mail: kvsemenov@bk.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, Polytechnicheskaya 29, 195251, Saint Petersburg.

Makeev, Artem A. Master student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, Polytechnicheskaya 29, 195251, Saint Petersburg.

Amelina, Aleksandra V. Master student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, Polytechnicheskaya 29, 195251, Saint Petersburg.

Received in April 2019

Для цитирования:

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 им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 30–39. DOI: 10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550

For citation:

Makeeva A.V., Semenov K.V., Makeev A.A., Amelina A.V. Crack resistance of massive concrete structures during the building period taking into account temperature effects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 30–39. DOI: 10.34031/article_5d49408e0e0b61.97206550