

УДК 693.557

УЧЕТ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ БЕТОНА В РАСЧЁТАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАССИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

К.В. Семенов, Н.С. Титов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Статья посвящена учету тепловыделения бетона в расчётах термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций, это является очень важной и актуальной задачей в строительный период для различных объектов, от жилых и административных высотных зданий до объектов атомной отрасли и строительства гидротехнических сооружений. В работе проведены расчеты и исследования по совершенствованию методики определения термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций на основании экспериментальных и теоретических данных. Исследовалось термонапряженное состояние фундаментных плит высотой 1, 2, 3 и 4 метра. Проведена сравнительная оценка результатов расчёта термонапряженного состояния массивной бетонной конструкции, возникающего в результате реакции гидратации цемента, с использованием уравнения И.Д. Запорожца в первоначальном и откорректированном виде, разница между расчетами показала снижение максимальных температур в ядре конструкции на 20,6%, а максимальных растягивающих напряжений на ее поверхности на 8,4%.

Ключевые слова: термонапряженное состояние, термическая трещиностойкость, массивные железобетонные конструкции, массивные бетонные конструкции, гидратация цемента; строительный период, тепловыделение бетона.

Ссылка для цитирования: Семенов К.В., Титов Н.С. Учет тепловыделения бетона в расчётах термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций // Инженерные исследования. 2024. №1 (16). С. 3-12. EDN: BMDLER.

ACCOUNTING THE HEAT GENERATION OF CONCRETE WHEN CALCULATING THERMAL CRACK RESISTANCE OF MASSIVE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

K.V. Semenov, N.S. Titov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The article is devoted to taking into account the heat release of concrete in the calculations of the thermal crack resistance of massive reinforced concrete structures; this is a very important and urgent task during the construction period for various objects, from residential and administrative high-rise buildings to nuclear industry facilities and the construction of hydraulic structures. The work carried out calculations and research to improve the methodology for determining the thermal crack resistance of massive reinforced concrete structures based on experimental and theoretical data. The thermally stressed state of foundation slabs with a height of 1, 2, 3 and 4 meters was studied. A comparative assessment of the results of calculating the thermally stressed state of a massive concrete structure resulting from the cement hydration reaction was carried out using the equation I.D. Zaporozhets in its original and corrected form, the difference between the calculations showed a decrease in the maximum temperatures in the core of the structure by 20.6%, and the maximum tensile stresses on its surface by 8.4%.

Keywords: thermal stressed state, thermal cracking resistance, massive concrete structures, massive reinforced concrete structures, hydration of cement; building period, heat dissipation of concrete.

For citation: Semenov K.V., Titov N.S. Accounting the heat generation of concrete when calculating thermal crack resistance of massive reinforced concrete structures // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.1 (16). Pp. 3-12. EDN: BMDLER.

ВВЕДЕНИЕ

В массивных бетонных и железобетонных конструкциях в строительный период возможно появление трещин в результате неравномерной усадки бетона при высыхании, или перепада температур между ядром и поверхностью конструкции в результате реакции гидратации цемента [1]. Изменение температуры бетона зависит от его исходной температуры, соотношения объема и площади поверхности [2]. Кроме того, химический состав цемента, в частности соединения С3А (алюминат трикальция) и С3S (трехкальциевый силикат), оказывает основное влияние на изменение температуры. Водно-цементное соотношение, размер частиц цемента, температура бетонной смеси и твердения также влияют на выделение тепла. При увеличении водно-цементного соотношения, размера частиц или температуры отверждения, увеличивается тепловыделение при гидратации [3,4]. Важными параметрами являются скорость и количество выделяемого тепла в бетонных конструкциях большого размера. Накопленное тепло должно быть быстро рассеяно, чтобы избежать значительного повышения температуры внутри конструкции. Излишнее повышение температуры бетона не желательно, так как это может привести к быстрому затвердению бетона, а любое неравномерное охлаждение бетонной конструкции может создать напряжения из-за чего возможно возникновение трещин.

Поэтому еще на этапе проектирования и строительства разрабатываются конструктивные и технологические меры по предотвращению возникновения температурных трещин [5-7].

Выведенная Запорожцем И.Д. зависимость хорошо описывает кинетику тепловыделения бетонов того времени в зависимости от температуры и времени твердения. Эксперименты [8], проведенные для современных бетонов в лаборатории «Политех-СКИМ-Тест» наглядно показали расхождение значений тепловыделения на участке от 0 до 40 часов, между экспериментальными результатами и результатами на основе зависимости И.Д. Запорожца. Эта разница в результатах дает погрешность в расчетах термонапряжённого состояния бетона.

Поэтому целью данного исследования является разработка нового подхода к определению тепловыделения с использованием экспериментальных данных для более точного определения мер защиты бетона от образования трещин.

В настоящей работе исследовалось термонапряжённое состояние монолитных железобетонных фундаментных плит различной высоты, непрерывно бетонированных на всю одним блоком.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Массивные железобетонные фундаментные плиты имеют высоту 1, 2, 3 и 4 метра, характеристики и расчётные параметры представлены в табл.1.

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

| № | Параметры конструкции | Свойство |
|---|---|------------------------|
| 1 | Класс прочности бетона | В60 |
| 2 | Расход цемента для бетона, С | 230 кг/м ³ |
| 3 | Модуль деформации бетона, E_b | 45 ГПа |
| 4 | Температура окружающей среды | 20 °С |
| 5 | Температура бетонной смеси перед заливкой | 25 °С |
| 7 | Максимальное тепловыделение бетона, Q_{max} | 184 МДж/м ³ |
| 8 | Коэффициент роста скорости тепловыделения, A_{20} | 0,49 1/сут |
| 9 | Порядок реакции гидратации по воде, m | 2,2 |

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА

Для вычисления термонапряжённого состояния фундаментных плит применялось программное обеспечение TERM, разработанное в высшей школе промышленно-гражданского и дорожного строительства СПбПУ. Данная программа учитывает влияние температуры на деформационные и теплофизические свойства бетона.

Программа разделена на три блока. Первый блок отвечает за анализ и определение нестационарных температурных полей в бетонной конструкции, контактирующей с окружающей средой и. С помощью метода конечных разностей решается неоднородное дифференциальное уравнение теплопроводности (1):

$$c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial Q}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где:

- Q – теплота экзотермической реакции гидратации цемента, кДж/м³;
- c – удельная теплоёмкость бетона кДж/(кг·°C);
- λ – коэффициент внутренней теплопроводности бетона, Вт/(м·°C);
- γ – плотность бетона, кг/м³;
- t – температура, °C;
- τ – время, ч.

Скорость тепловыделения бетона, происходящего в результате реакции гидратации цемента определяется уравнением И.Д. Запорожца [9], рассматривается как функция температуры и времени и не зависит от координат рассчитываемого тела (2):

$$Q(\tau) = Q_{max} \left[1 - (1 + A_T \tau)^{\frac{1}{m-1}} \right], \quad (2)$$

где:

- Q_{max} – предел, к которому стремится тепловыделение бетона, кДж/м³;
- A_T – коэффициент темпа роста тепловыделения при постоянной во времени температуре T=20 °C, 1/сут;
- m – порядок реакции гидратации по воде.

Учет влияния температуры твердения бетона производится с помощью гипотезы приведенного времени. Смысл гипотезы следующий: текущее (реальное) время зависимости (2) заменяется на некоторое приведенное, являющееся функцией температур. Температурная функции принята в следующем виде (3):

$$f(t) = 2^{\frac{t_1 - t_2}{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где:

ε – характерная температурная разность представляет собой показатель изменения скорости выделения тепла при изменении температуры на ε градусов, °C. Значение характерной температурной разности зависит от текущей температуры.

На внешнем контуре конструкции принимаются граничные условия III рода, предполагающие, что теплообмен между поверхностью бетона и воздушной средой происходит по закону конвективного теплообмена Ньютона-Рихмана. При этом поток тепла, поступающий из внутренних слоёв бетона к поверхности, должен быть воспринят средой. Взаимодействие между исследуемым объектом и основанием рассматривается на их границе как граничное условие IV рода.

Второй блок разработан с целью нахождения термонапряжений при помощи полученных температурных полей. В нем решается с помощью МКР и численного интегрирования, система интегро-дифференциальных уравнений с учетом зависимостей описанных гипотезой Бернулли. В решении учитывается влияние температуры на деформационные характеристики бетона. Для связи между напряжениями и деформациями применяется линейная наследственная теория ползучести.

В третьем блоке при помощи деформационного критерия (сформулированного Васильевым П.И.) оценивается термическая трещиностойкость массивной бетонной конструкции [10].

Для повышения точности расчета термонапряженного состояния конструкции к зависимости Запорожца применена некоторая корректирующая функция, которая позволяет учесть при твердении бетона замедляющее действия гипса, суперпластификаторов и других добавок в уравнении.

Корректирующая функция была получена на основании экспериментальных данных приведенных в табл.2.

Таблица 2. Экспериментальное тепловыделение бетона
Table 2. Experimental heat dissipation of concrete

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Time τ , ч. | 4,0 | 8,0 | 12,1 | 16,0 | 20,3 | 24,2 | 28,2 | 32,4 | 35,8 | 40,0 |
| q_{test} кДж/кг | 6,0 | 12,6 | 32,5 | 62,2 | 97,3 | 125,5 | 149,6 | 169,0 | 181,5 | 194,4 |

Алгоритм ее нахождения был следующим:

1. Изначально были проанализированы различные графики функций, с целью выявить наиболее приближенный по виду к экспериментальному. Самым близким из всех оказался график функции кубической регрессии, так как имеет несколько точек перегиба, как и график, полученный на основе экспериментальных данных.

2. Таким образом есть неизвестная функция $q=f(\tau)$, заданная табличными значениями, которые были получены в ходе опытных измерений. Следовательно, необходимо найти кубическую функцию $q=F(\tau)$, которая в соответствующих точках принимает значения, как можно более близкие к табличным.

Для нахождения параметров функции F применялся метод наименьших квадратов. В данном методе используется сумма квадратов разностей между табличными значениями q и значениями, рассчитанными по уравнению регрессии, в качестве критерия близости приближающей функции к совокупности точек. Таким образом, необходимо найти функцию F , которая минимизирует сумму квадратов (4):

$$S = \sum_{i=1}^n (q_i - F(\tau_i))^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

3. Чтобы получить кубическую функцию вида $q=a\tau^3+b\tau^2+c\tau+d$, надо найти минимум функции S для четырех переменных a, b, c и d (5) для этого применяется условие экстремума, а именно, равенство нулю частных производных (6).

$$S(a,b,c,d) = \sum_{i=1}^n (a\tau_i^3 + b\tau_i^2 + c\tau_i + d - q_{test,i})^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_a = \sum_{i=1}^n 2(a\tau_i^3 + b\tau_i^2 + c\tau_i + d - q_{test,i}) \cdot \tau_i^3 = 0 \\ S'_b = \sum_{i=1}^n 2(a\tau_i^3 + b\tau_i^2 + c\tau_i + d - q_{test,i}) \cdot \tau_i^2 = 0 \\ S'_c = \sum_{i=1}^n 2(a\tau_i^3 + b\tau_i^2 + c\tau_i + d - q_{test,i}) \cdot \tau_i = 0 \\ S'_d = \sum_{i=1}^n 2(a\tau_i^3 + b\tau_i^2 + c\tau_i + d - q_{test,i}) \cdot 1 = 0 \end{array} \right., \quad (6)$$

4. Далее эта система уравнений преобразуется в следующий вид (7) с четырьмя неизвестными a, b, c и d , все остальные значения находятся при помощи таблицы 2 и сведены в таблицу вспомогательных величин (табл. 3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^6 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^5 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^4 \right) c + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^3 \right) d = \sum_{i=1}^n \tau_i^3 \cdot q_{test,i} \\ \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^5 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^4 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^3 \right) c + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^2 \right) d = \sum_{i=1}^n \tau_i^2 \cdot q_{test,i} \\ \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^4 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^3 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^2 \right) c + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right) d = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot q_{test,i} \\ \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^3 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i^2 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \right) c + d \cdot n = \sum_{i=1}^n q_{test,i} \end{array} \right., \quad (7)$$

Таблица 3. Вспомогательные величины
Table 3. Auxiliary values

| i | τ_i | $q_{\text{test},i}$ | τ_i^2 | τ_i^3 | τ_i^4 | τ_i^5 | τ_i^6 | $\tau_i \cdot q_{\text{test},i}$ | $\tau_i^2 \cdot q_{\text{test},i}$ | $\tau_i^3 \cdot q_{\text{test},i}$ |
|----------|----------|---------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 4,0 | 6,0 | 16,00 | 64,00 | 256,0 | 1024 | 4096 | 24,00 | 96,00 | 384,0 |
| 2 | 8,0 | 12,6 | 64,00 | 512,0 | 4096 | $32,77 \cdot 10^3$ | $26,21 \cdot 10^4$ | 100,8 | 806,4 | 6451 |
| 3 | 12,1 | 32,5 | 146,4 | 1772 | $21,44 \cdot 10^3$ | $25,94 \cdot 10^4$ | $313,8 \cdot 10^4$ | 393,3 | 4758 | $57,56 \cdot 10^3$ |
| 4 | 16,0 | 62,2 | 256,0 | 4096 | $65,54 \cdot 10^3$ | $10,49 \cdot 10^5$ | $167,8 \cdot 10^5$ | 995,2 | $15,92 \cdot 10^3$ | $254,8 \cdot 10^3$ |
| 5 | 20,3 | 97,3 | 412,1 | 8365 | $16,98 \cdot 10^4$ | $34,47 \cdot 10^5$ | $699,8 \cdot 10^5$ | 1975 | $40,10 \cdot 10^3$ | $814,0 \cdot 10^3$ |
| 6 | 24,2 | 125,5 | 585,6 | $14,17 \cdot 10^3$ | $34,30 \cdot 10^4$ | $83,00 \cdot 10^5$ | $200,9 \cdot 10^6$ | 3037 | $73,50 \cdot 10^3$ | $177,9 \cdot 10^4$ |
| 7 | 28,2 | 149,6 | 795,2 | $22,43 \cdot 10^3$ | $63,24 \cdot 10^4$ | $178,3 \cdot 10^5$ | $502,9 \cdot 10^6$ | 4219 | $11,90 \cdot 10^4$ | $335,5 \cdot 10^4$ |
| 8 | 32,4 | 169,0 | 1050 | $34,01 \cdot 10^3$ | $11,02 \cdot 10^5$ | $357,0 \cdot 10^5$ | $115,7 \cdot 10^7$ | 5476 | $17,74 \cdot 10^4$ | $574,8 \cdot 10^4$ |
| 9 | 35,8 | 181,5 | 1282 | $45,88 \cdot 10^3$ | $16,43 \cdot 10^5$ | $588,1 \cdot 10^5$ | $210,5 \cdot 10^7$ | 6498 | $23,26 \cdot 10^4$ | $832,8 \cdot 10^4$ |
| 10 | 40,0 | 194,4 | 1600 | $64,00 \cdot 10^3$ | $25,60 \cdot 10^5$ | $1024 \cdot 10^5$ | $4096 \cdot 10^6$ | 7776 | $31,10 \cdot 10^4$ | $124,4 \cdot 10^5$ |
| Σ | 221 | 1031 | 6207 | $1953 \cdot 10^2$ | $65,41 \cdot 10^5$ | $227,8 \cdot 10^6$ | $815,2 \cdot 10^7$ | $30,49 \cdot 10^3$ | $97,52 \cdot 10^4$ | $327,8 \cdot 10^5$ |

Примечание: τ_i – время, ч; $q_{\text{test},i}$ – экспериментальное тепловыделение бетона, кДж/кг.

5. После этого вычисляются коэффициенты полинома третьей степени a , b , c и d из системы уравнений:

$$\begin{cases} 195300a + 6207b + 221c + 11d = 1031 \\ 65,41 \cdot 10^5 a + 195300b + 6207c + 221d = 30490 \\ 227,8 \cdot 10^6 a + 65,41 \cdot 10^5 b + 195300c + 6207d = 975200 \\ 8152 \cdot 10^7 a + 227,8 \cdot 10^6 b + 65,41 \cdot 10^5 c + 195300d = 327,8 \cdot 10^5 \end{cases}$$

Которая решается методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 195300 & 6207 & 221 & 11 \\ 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 6207 & 221 \\ 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 6207 \\ 815,2 \cdot 10^7 & 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 \end{vmatrix} \approx 106988 \cdot 10^{12}$$

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 1031 & 6207 & 221 & 11 \\ 30490 & 195300 & 6207 & 221 \\ 97,52 \cdot 10^4 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 6207 \\ 327,8 \cdot 10^5 & 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 \end{vmatrix} \approx -70523 \cdot 10^{10}$$

$$\Rightarrow a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{-70523 \cdot 10^{10}}{106988 \cdot 10^{12}} \approx -0.006592$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 195300 & 1031 & 221 & 11 \\ 65,41 \cdot 10^5 & 30490 & 6207 & 221 \\ 227,8 \cdot 10^6 & 97,52 \cdot 10^4 & 195300 & 6207 \\ 815,2 \cdot 10^7 & 327,8 \cdot 10^5 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 \end{vmatrix} \approx 435322 \cdot 10^{11}$$

$$\Rightarrow b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{435322 \cdot 10^{11}}{106988 \cdot 10^{12}} \approx 0.406888$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 195300 & 6207 & 1031 & 11 \\ 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 30490 & 221 \\ 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 97,52 \cdot 10^4 & 6207 \\ 815,2 \cdot 10^7 & 227,8 \cdot 10^6 & 327,8 \cdot 10^5 & 195300 \end{vmatrix} \approx -102154 \cdot 10^{11}$$

$$\Rightarrow c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{-102154 \cdot 10^{11}}{106988 \cdot 10^{12}} \approx -0.95482$$

$$\Delta d = \begin{vmatrix} 195300 & 6207 & 221 & 1031 \\ 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 6207 & 30490 \\ 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 195300 & 97,52 \cdot 10^4 \\ 815,2 \cdot 10^7 & 227,8 \cdot 10^6 & 65,41 \cdot 10^5 & 327,8 \cdot 10^5 \end{vmatrix} \approx 342019 \cdot 10^{11}$$

$$\Rightarrow d = \frac{\Delta d}{\Delta} = \frac{342019 \cdot 10^{11}}{106988 \cdot 10^{12}} \approx 0.31968$$

6. В результате проделанных вычислений, искомое уравнение кубической регрессии имеет следующий вид (8):

$$q_{cor} = -0.006592 \cdot \tau^3 + 0.406888 \cdot \tau^2 - 0.95482 \cdot \tau + 0.31968 \quad (8)$$

где:

q_{cor} – корректирующая функция удельного тепловыделения, кДж/кг;
 τ – время, ч.

Полученная формула $q=F(\tau)$, которую называют эмпирической формулой, или уравнением регрессии q на τ , или приближающей (аппроксимирующей) функцией, позволяет находить значения $f(\tau)$ для нетабличных значений τ , сглаживая результаты измерений величины q .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ БЕТОНА

Значения тепловыделения бетона, полученные в ходе лабораторных испытаний и с использованием уравнения Запорожца [8], а также вычисленные с применением корректирующей функции представлены на рис.1.

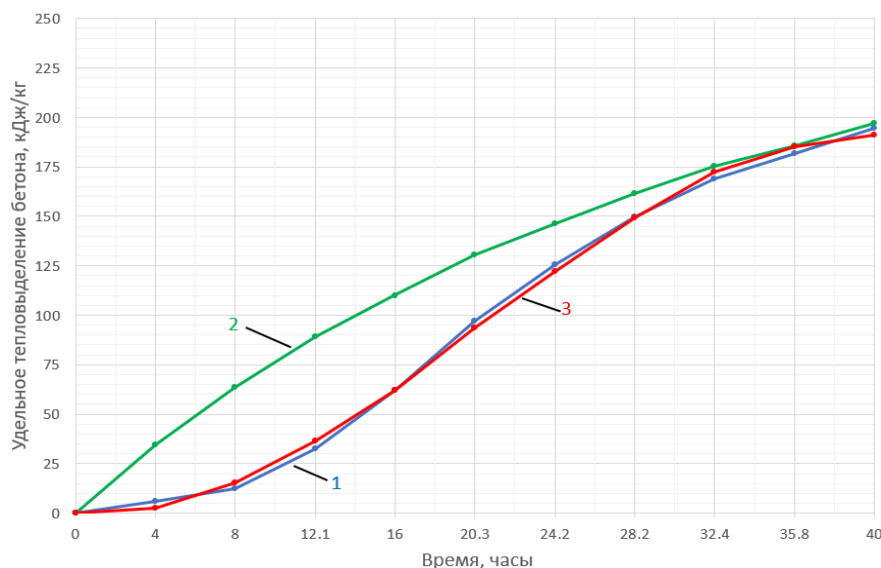


Рис. 1. Удельное тепловыделение бетона: 1 – экспериментальное; 2 – по уравнению Запорожца; 3 – с применением корректирующей функции

Fig. 1. Specific heat generation of concrete: 1 – experimental; 2 – according to the Zaporozhets equation; 3 – with the use of a corrective function

Расхождения результатов с использованием корректирующей функции и экспериментальных данных не превысили 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Корректирующая функция (8) была апробирована на четырех расчетных случаях, для фундаментных плит различной толщины. Результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Результаты расчетов термонапряженного состояния
Table 6. The results of calculations of the thermally stressed state

| № | Расчетный случай | | Время, сут. | Максимальная температура центра/поверхности, °С | Максимальная температура перепада, °С | Максимальные растягивающие напряжения в центре, МПа |
|---|-----------------------------------|------------------------------|-------------|---|---------------------------------------|---|
| 1 | Тепловыделение плиты толщиной 1 м | а) по зависимости Запорожца | 2 | 61,40/39,93 | 22,39 | 2,71 |
| | | б) с корректирующей функцией | 3 | 46,20/32,3 | 14,57 | 1,53 |
| 2 | Тепловыделение плиты толщиной 2 м | а) по зависимости Запорожца | 3 | 79,56/40,4 | 39,93 | 4,74 |
| | | б) с корректирующей функцией | 4 | 62,56/34,0 | 29,12 | 4,07 |
| 3 | Тепловыделение плиты толщиной 3 м | а) по зависимости Запорожца | 4 | 85,48/40,0 | 48,97 | 6,7 |
| | | б) с корректирующей функцией | 5 | 69,51/33,9 | 37,45 | 5,96 |
| 4 | Тепловыделение плиты толщиной 4 м | а) по зависимости Запорожца | 6 | 88,07/39,5 | 54,00 | 7,61 |
| | | б) с корректирующей функцией | 7 | 73,03/33,6 | 42,37 | 7,02 |

Из таблицы следует вывод, что значения температур и напряжений на поверхности и ядре конструкции, независимо от ее толщины, при применении корректирующей формулы будут меньше значений с использованием уравнения Запорожца. Графически данное различие (сплошная линия – зависимость Запорожца, пунктирная линия – корректирующая функция) представлено на примере плиты высотой 4 м на рис.2 и рис.3. Значения и графики для низа плиты не представлены, поскольку растягивающие напряжения на нижней поверхности плиты не превышают 10% напряжений от верхней поверхности.

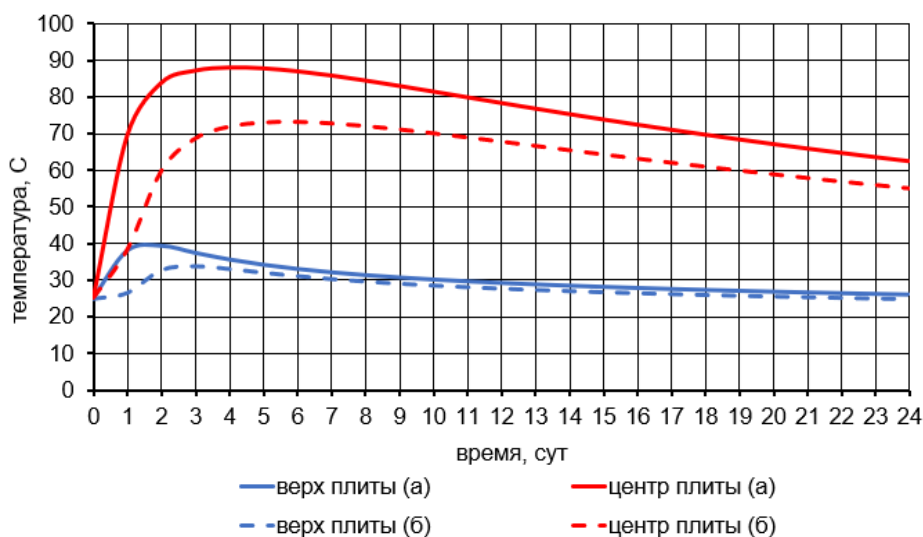


Рис. 2. Изменение температур в центре, на верхней и нижней поверхностях плиты фундамента с учетом теории Запорожца – (а) и с учетом корректирующей функции – (б)

Fig. 2. Temperature changes in the center, on the upper and lower surfaces of the foundation slab, taking into account the theory of Zaporozhets – (a) and taking into account the corrective function – (b)

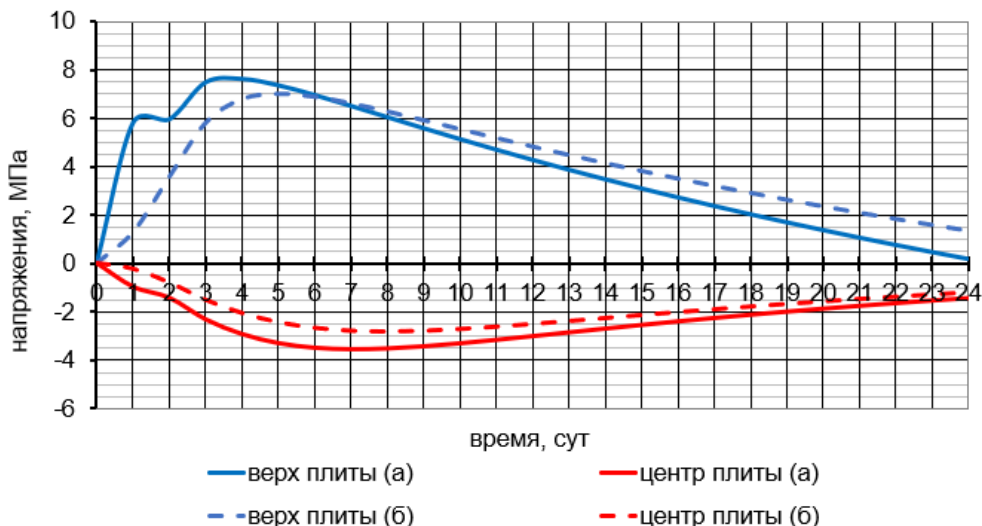


Рис. 3. Изменение термонапряжений в центре, на верхней и нижней поверхностях плиты фундамента с учетом теории Запорожца – (а) и с учетом корректирующей функции – (б)

Fig. 3. Changes in thermal stresses in the center, on the upper and lower surfaces of the foundation slab, taking into account the theory of Zaporozhets – (a) and taking into account the corrective function – (b)

В обоих случаях характер изменения температурных полей и эпюр напряжений в центре и на поверхности плиты во времени одинаков.

На рис.4 показано изменение перепада максимальных температур между центром и верхней поверхностью (сплошная линия – зависимость Запорожца, пунктирная линия – корректирующая функция) фундаментной плиты во времени. Наибольшая разница между значениями расчетных случаев наблюдается у плиты толщиной 1 м, она составляет 53,7%, а наименьшая у плиты толщиной 4 м равная 27,45%.

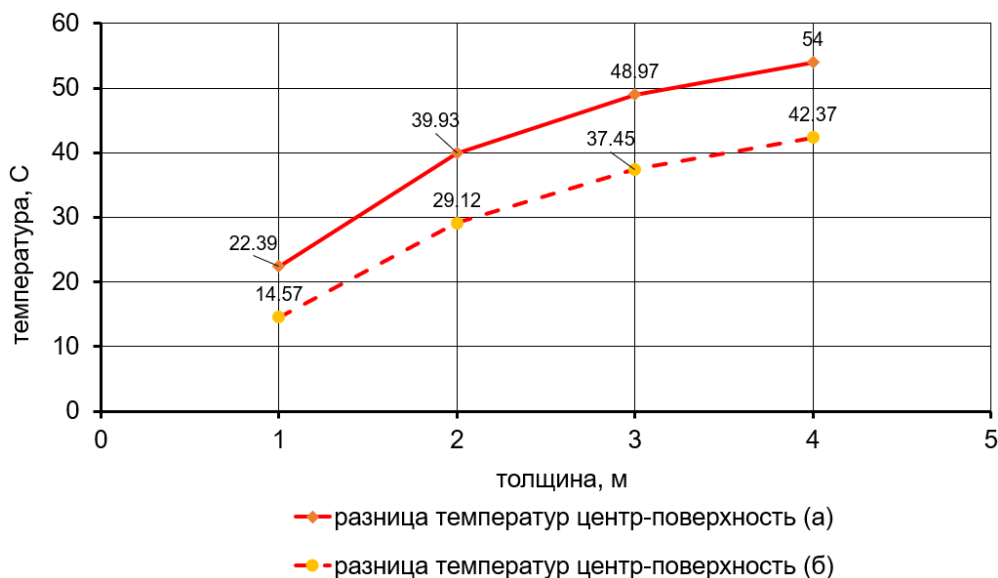


Рис. 4. Графики изменения максимальных перепадов температур в зависимости от толщины плиты с учетом теории Запорожца – (а) и с учетом корректирующей функции – (б)

Fig. 4. Graphs of changes in maximum temperature differences depending on the thickness of the slab, taking into account the Zaporozhets theory - (a) and taking into account the correction function - (b)

Рис.5 демонстрирует рост значений (сплошная линия – зависимость Запорожца, пунктирная линия – корректирующая функция) напряжений в ядре конструкции с увеличением толщины фундаментной плиты с течением времени. Максимальная разница между результатами наблюдается у плиты высотой 1 м, равная 77,12%, а минимальная составляет 8,4% для плиты толщиной 4м.

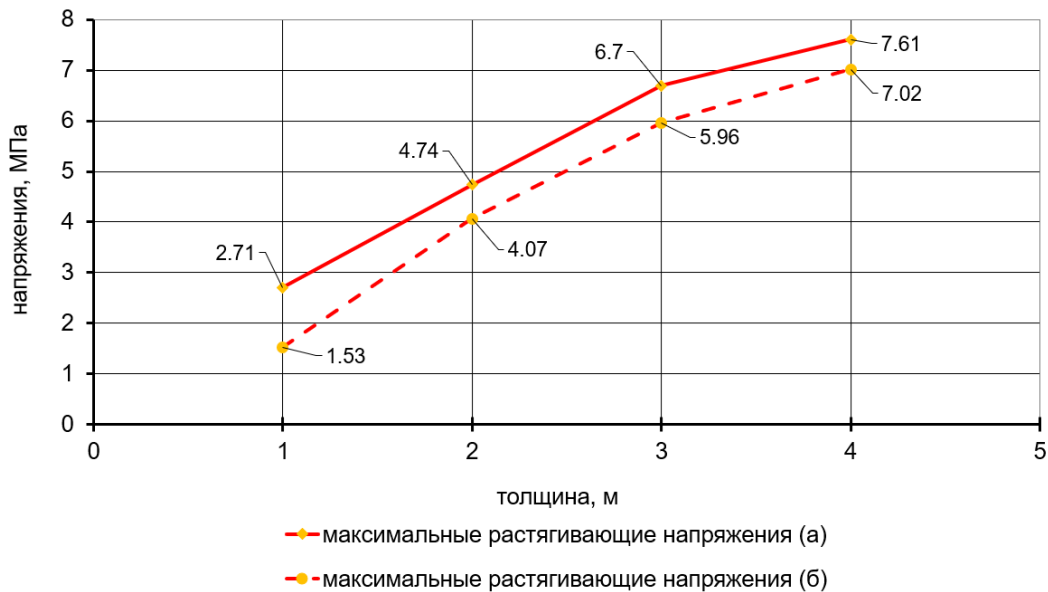


Рис. 5. Графики изменения максимальных напряжений в ядре конструкции в зависимости от толщины плиты, с учетом теории Запорожца – (а) и с учетом корректирующей функции – (б)

Fig. 5. Graphs of changes in maximum stresses in the core of the structure depending on the thickness of the slab, taking into account the Zaporozhets theory - (a) and taking into account the correction function - (b)

Характер изменения графиков температурных полей (рис. 4) и термонапряжений (рис. 5) одинаков с течением времени. При использовании корректирующей функции наблюдается отсрочка разницы значений максимальных температур и напряжений на сутки для большинства случаев. Применение корректирующей функции поможет в разработке более подходящих мер по защите конструкции от образования трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчетов и исследований были сформированы следующие выводы:

1. Получено описание функции изменения выделения тепла со временем, которая близка к экспериментальным данным, с использованием корректирующей функции $s = f(\tau)$. Было показано графически, что расхождение результатов с использованием корректирующей функции и экспериментальных данных не превысили 5%.
2. Корректирующая функция была применена при расчетах термонапряженного состояния и термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций. Выполненные расчеты показали снижение максимальных температур в ядре конструкции на 20,6%, и максимальных растягивающих напряжений на верхней поверхности на 8,4%.
3. Выявленное снижение опасных растягивающих напряжений на верхней поверхности конструкции должно привести к снижению затрат необходимых для обеспечения термической трещиностойкости строительных конструкций в строительный период. Конкретные результаты предполагается получить в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
2. Cherpurnenko A., Nesvetaev G., Koryanova Yu., Modeling non-stationary temperature fields when constructing mass cast-in-situ reinforced-concrete foundation slabs // Architecture and Engineering. 2022. № 2(7). С. 66-78. EDN AKGXYN.
3. Анишкин Н.А., Шайтанов А.М. Натурный эксперимент по тепловыделению бетона и использование его результатов для верификации программного комплекса ANSYS // Вестник МГСУ. 2022. № 6(17). С. 727-737. EDN: FPHFCK.
4. Srimook P., Maruyama I., Shibuya K., Tomita S., Igarashi G., Hibino Y., Yamada K. Evaluation of thermal crack width and crack spacing in massive reinforced concrete structures subject to external restraints using RBSM // Engineering Fracture Mechanics. 2022. Т. 274. С. 108800. EDN: CLPTBM.
5. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Predictive Model of Temperature Regimes of a Concrete Gravity Dam during Construction: Reducing Cracking Risks // Buildings. 2023. №. 8(13). С. 1954.

6. Wang D.B., Song X.B., Nie H.Y. Cracking analysis of massive concrete with large diameter pipes during construction // Construction and Building Materials. 2022. Т. 338. С. 127636. EDN: QJQUJE

7. Ho N.T., Nguyen T.C., Bui A.K., Huynh T.P. Temperature field in mass concrete at early-age: Experimental research and numerical simulation // International Journal on Emerging Technologies. 2020. № 3(11). С. 936-941. EDN SQBXJG.

8. Ivanov E.N., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Akimov S.V., Kuleshin A.S., Titov N.S. Concrete heat liberation in thermal stressed state analysis // Magazine of Civil Engineering. 2023. №8(124). С. 12409.

9. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона / И.Д. Запорожец. - Л.-М.: Стройиздат, 1966. 314 с.

10. Васильев П.И. Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом влияния времени // Известия ВНИИГ. 1951. Т. 45. С. 78-92.

ОБ АВТОРАХ

Кирилл Владимирович Семенов – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: kvsemenov@bk.ru

Никита Сергеевич Титов – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tns93@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Kirill V. Semenov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: kvsemenov@bk.ru

Nikita S. Titov – master's degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tns93@mail.ru