

УДК 693.557 + 693.547.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫДЕРЖИВАНИИ БЕТОНА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

А.А. Мельник

Рассмотрена математическая модель теплообменных процессов в бетоне фундаментной плиты, выдерживаемой в зимних условиях методом термоса. Сопоставлены результаты по температуре и прочности бетона, полученные на основании математического моделирования теплообменных процессов и рассчитанные классическим методом, основанном на регулярном режиме остывания конструкции.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, моделирование теплообменных процессов, расчет прочности бетона.

Правильный выбор параметров зимнего бетонирования снижает затраты электроэнергии, трудозатраты, расходы на материалы и оборудование, сокращает сроки строительства, уменьшить его стоимость [1].

Существуют несколько способов расчета параметров зимнего бетонирования. Наиболее широкое применение получил классический метод, основанный на регулярном режиме остывания конструкций [2]. Недостаток метода заключается в неполном учете тепловыделений цемента в процессе твердения бетона. При выдерживании бетона тонкостенных конструкций в зимних условиях термические выделения тепла при гидратации цемента не столь велики, и погрешность расчета классическим методом будет незначительна, однако для расчета массивных конструкций, где экзотермические выделения тепла имеют существенное значение, расчет по классическому методу [2] может иметь приближенный характер.

Для уточнения и корректировки классического метода было предложено выполнять расчет температуры и продолжительности выдерживания бетона с использованием математического моделирования теплообменных процессов. Для решения этой задачи расчет параметров зимнего бетонирования выполнялся двумя методами: классическим [2] и на основании математической модели [3].

Расчетной конструкцией являлась фундаментная плита с модулем поверхности $M_p=3,43 \text{ м}^{-1}$, изображенная на рис. 1, выдерживаемая методом термоса в зимних условиях. Класс бетона плиты В15 (ПЦ), температура наружного воздуха, принятая в расчете – минус $10 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра – 5 м/с .

При математическом моделировании фундаментная плита разбивалась на 300 элементов – симплексов, грунт под фундаментной плитой на 100 симплексов, задавали граничные условия теплообмена с неотогретым грунтом, с окружающим воздухом и получали значение температуры в каждом сим-

плексе через 2 часа. В результате, была получена система уравнений, позволяющая определить температуру произвольного элемента при трехмерном нестационарном температурном поле с учетом экзотермических выделений тепла при твердении цемента [4].

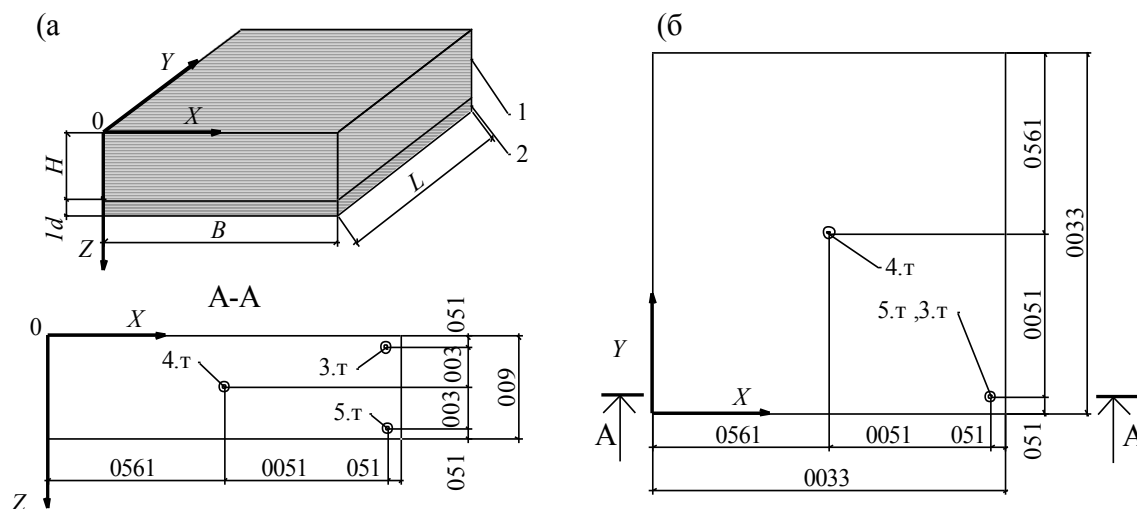


Рис. 1. Рассчитываемая конструкция: а) расчетная схема плиты; б) схема расположения контрольных точек; 1 – плита; 2 – грунт под плитой; т.3, т.4, т.5 – контрольные точки

Математическая модель трехмерного температурного поля бетонированной фундаментной плиты имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{c_i \cdot \rho_i} \left(\frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + \frac{\omega(\tau)}{c_1 \cdot \rho_1}, \quad (1)$$

для грунта основания $[\omega(\tau) = 0]: i = 2; 0 \leq x \leq B; 0 \leq y \leq L;$

$$H \leq z \leq H + d; 0 \leq \tau \leq \tau_k; t(x, y, z, 0) = t_{гр}, \quad (2)$$

для плиты $[\omega(\tau) \neq 0]: i = 1; 0 \leq x \leq B; 0 \leq y \leq L; 0 \leq z \leq H;$

$$0 \leq \tau \leq \tau_k; t(x, y, z, 0) = t_0, \quad (3)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x=0 \vee x=B, y, z, \tau)}{\partial x} = k_{б.о.} \cdot [t(x=0 \vee x=B, y, z, \tau) - t_h(\tau)]; 0 \leq y \leq L; \quad (4)$$

$$0 \leq z \leq H; 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (4)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y=0 \vee y=L, z, \tau)}{\partial y} = k_{б.о.} \cdot [t(x, y=0 \vee y=L, z, \tau) - t_h(\tau)]; 0 \leq x \leq B; \quad (5)$$

$$0 \leq z \leq H; 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = k_{б.о.} \cdot [t(x, y, z=0, \tau) - t_h(\tau)]; 0 \leq x \leq B; 0 \leq y \leq L; \quad (6)$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (6)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y, z=H, \tau)}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial t(x, y, z=H, \tau)}{\partial z}; 0 \leq x \leq B; 0 \leq y \leq L; 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (7)$$

$$t_1(x, y, H, \tau) = t_2(x, y, H, \tau); 0 \leq x \leq B; 0 \leq y \leq L; 0 \leq \tau \leq \tau_k, \quad (8)$$

где c_1, c_2 – удельная теплоемкость соответственно бетона и грунта основания, Вт·ч/(кг·°С), (во всех обозначениях индекс «1» относится к бетонируемой конструкции, индекс «2» – к грунту основания под фундаментной плитой); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); ρ – плотность, кг/м³; $t_{гр}, t_0$ – начальная температура соответственно грунта под плитой и свежеуложенного бетона, °С; τ_k – время термообработки, ч; $k_{б.о.}, k_{в.о.}$ – коэффициент теплопередачи поверхности соответственно боковых щитов опалубки и утепления неопалубленных поверхностей фундаментной плиты, Вт/(м²·°С); t_n – температура наружного воздуха, °С; $\omega(\tau)$ – удельная мощность объемного источника теплоты (экзотермия цемента), Вт/м³.

Представленная математическая модель состоит из следующих элементов:

(1) – дифференциальное уравнение теплопроводности для возводимой фундаментной плиты, а также для грунта основания под конструкцией;

(2) – начальные условия для грунта под конструкцией;

(3) – начальные условия для бетонируемой фундаментной плиты;

(4), (5) – граничные условия III – рода (теплообмен твердого тела с окружающей воздушной средой, описываемый законом Ньютона – Рихмана) для боковых поверхностей опалубки плиты;

(6) – граничные условия III – рода для верхней неопалубленной поверхности плиты;

(7), (8) – граничные условия IV – рода (условие теплового примыкания двух твердых тел) для нижней поверхности возводимой плиты в зоне контакта свежеуложенного бетона с грунтом основания.

Полученная система уравнений, позволяет определить температуру произвольного элемента при трехмерном нестационарном температурном поле с учетом экзотермических выделений тепла при твердении цемента [4].

Для численного интегрирования приведенная система уравнений аппроксимировалась конечно-разностной схемой, решение которой реализовывалось численным методом тепловых балансов.

Реализация разработанной математической модели была выполнена в программе, составленной в среде «Microsoft Excel», позволяющей выполнить расчет температуры, продолжительности выдерживания, прочности бетона фундаментной плиты.

Расчет параметров зимнего бетонирования по сравниваемым методам производился в трех контрольных точках (рис. 1), одной центральной – т.4 и двум периферийным – т.3, т.5.

Полученные значения температуры в бетоне фундаментной плиты, продолжительность выдерживания бетона, прогнозируемая прочность, найденные по классическому методу расчета [2] и по математической модели [3] приведены на рис. 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. При классическом методе расчета [2] максимальной является температура бетона при укладке (+15 °С), в процессе выдерживания температура плавно понижается до 0 °С (рис. 2, график 4; 5), при этом значения для верхней т.3 и нижней т.5 контрольной точки совпадают, поскольку влияние граничных условий существующим методом полностью не учитывается (рис. 2, график 5). При расчете температуры бетона по математической модели [3], температурные графики имеют ярко выраженный максимум в интервале 30–50 часов, связанный с пиком экзотермических выделений тепла в процессе гидратации цемента. После прохождения максимума при дальнейшем выдерживании графики изменения температуры имеют ниспадающий характер (рис. 2, графики 1, 2, 3).

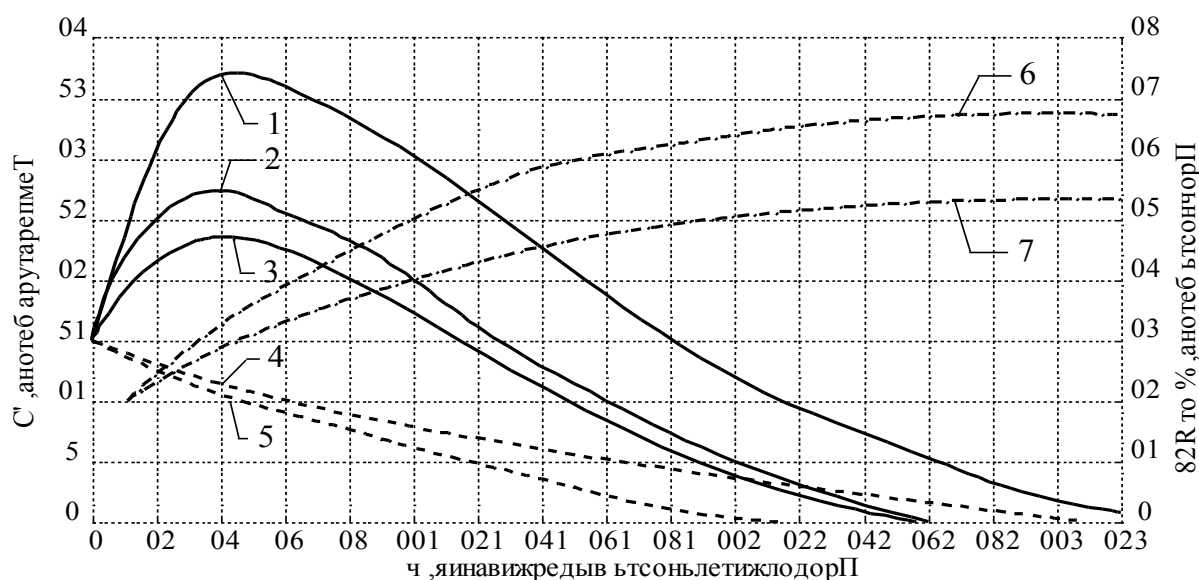


Рис. 2. Температура и прочность бетона плиты в процессе выдерживания: 1, 2, 3 – графики изменения температуры соответственно в центральной, верхней, нижней контрольных точках, полученные по [3]; 4, 5 – график изменения температуры, соответственно, в центральной и верхней (нижней) контрольных точках, полученные по [2]; 6, 7 – графики нарастания прочности для нижней контрольной точки плиты, полученные, соответственно, по [3], по [2]

2. Данные о продолжительности выдерживания бетона в центральной точки конструкции, полученные по сравниваемым методам, имеют хорошую корреляцию: расхождение составляет не более 12 часов (графики 1, 4 рис. 2) при общей продолжительности остывания 321 ч.

3. Прочность бетона нижней контрольной точки, вычисленная на основании математической модели, составляет 67 % от марочной (график 6 рис. 2). Прочность бетона этой же точки, подсчитанная по существующему методу [2], составляет 53 % от марочной (график 7 рис. 2).

Таким образом, расчет параметров зимнего бетонирования массивных конструкций с использованием математического моделирования теплообменных процессов позволяет более точно учитывать влияние граничных условий и экзотермических выделений тепла на температуру бетона, чем классический метод. Результаты вычислений с использованием математической модели позволяют уменьшить период выдерживания бетона, увеличить обрачиваемость опалубки, сократить продолжительность строительства.

Библиографический список

1. Головнев, С.Г. Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов / С.Г. Головнев. – Челябинск.: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 156 с.
2. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 313 с.
3. Мельник, А.А. Совершенствование технологии конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Мельник. – Челябинск: ЮУрГУ, 2002. – 22 с.
4. Бучко, Н.А. Расчет температур в бетонной кладке плотин / Н.А. Бучко, Г.Н. Данилова. – М.: Энергия, 1971. –105 с.