

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕТОНА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ В ГЕЛИОКАМЕРАХ ТИПА «ГОРЯЧЕГО ЯЩИКА»

Н.И. Подгорнов, Д.Д. Коротеев

Кафедра строительного производства
Московская государственная академия
коммунального хозяйства и строительства
ул. Средняя Калитниковская, 30, Москва, Россия, 109029

Дано математическое описание теплофизических процессов формирования температурного поля бетона при термообработке его с использованием солнечной энергии. Сформулированы условия однозначности для решения дифференциального уравнения теплопроводности. Термообработка осуществляется в гелиокамерах, работающих по принципу «горячего ящика». Приведены схема, конструктивные особенности и технологические преимущества гелиотехнических устройств типа «горячего ящика».

Ключевые слова: гелиокамеры, бетон, солнечная энергия.

В условиях ограниченной территории полигона, на котором изготавливают железобетонные изделия с использованием солнечной энергии, целесообразно применение гелиотехнических устройств типа «горячего ящика». Эти установки компактны, обладают технологической гибкостью, подходят для реализации пакетной технологии выдерживания изделий различных геометрических размеров.

Сущность принципа «горячего ящика» заключается в том, что внутри гелиотехнического устройства размещают тепловоспринимающий материал, который поглощает солнечное излучение, нагревается и становится генератором тепловой энергии.

Конструкция гелиокамеры, работающей по принципу «горячего ящика», представляет собой прямоугольную металлическую емкость без днища с закрепленным вокруг нее прозрачным ограждением и теплоизоляцией стены, ориентированной на север (рис. 1).

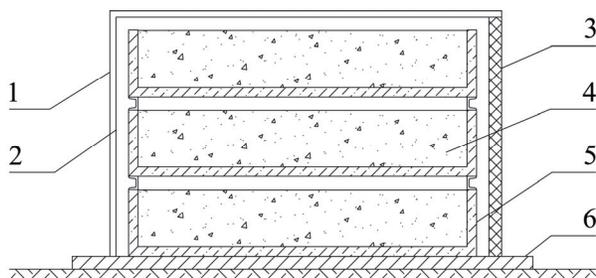


Рис. 1. Схема гелиотехнического устройства типа «горячего ящика»:

- 1 — прозрачное ограждение; 2 — металлическая емкость;
- 3 — теплоизолированная стена; 4 — железобетонные изделия;
- 5 — опалубочные формы; 6 — стэнд

Температурный режим в гелиокамере зависит от теплоемкости тепловоспринимающего материала, интенсивности солнечного излучения и теплоизоляционных свойств прозрачного ограждения ее стен и крыши, влажностный режим формируется за счет испарения воды затворения из бетона.

Температурное поле в твердеющем бетоне описывают уравнением теплопроводности Фурье с учетом внутреннего (объемного) источника теплоты, которым является тепловыделение в результате гидратации цемента (1):

$$\frac{\partial t_{\text{б}}(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_{\text{б}}(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{P_{\text{ц}}}{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}}} \cdot \frac{d\mathcal{E}_{\text{ц}}}{d\tau}, \quad (1)$$

где α — коэффициент температуропроводности бетона, $\text{м}^2/\text{с}$; $P_{\text{ц}}$ — удельный расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{б}}$ — теплоемкость бетона, $\text{Дж}/(\text{°C кг})$; $\rho_{\text{б}}$ — плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\mathcal{E}_{\text{ц}}$ — удельное тепловыделение цемента, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности принято одномерным (поток тепла направлен по нормали к поверхности бетонного изделия).

Так как теплота гидратации цемента зависит от температуры и времени, во второй части уравнения (1) использована полная производная.

При использовании частных производных уравнение (1) принимает вид (2) [1]:

$$\frac{\partial t_{\text{б}}(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_{\text{б}}(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{P_{\text{ц}}}{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}}} \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{ц}}}{\partial t_{\text{б}}(x, \tau)} \cdot \frac{\partial t_{\text{б}}(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \mathcal{E}_{\text{ц}}}{\partial \tau} \right). \quad (2)$$

Чтобы дать полное математическое описание процесса формирования температурного поля бетона при термообработке его в гелиотехнических устройствах типа «горячего ящика» необходимо внести условия однозначности.

Теплофизические характеристики бетона, а также зависимости удельного тепловыделения цементов различных марок от времени и температуры приведены в работе [2].

Начальное условие (временное краевое условие) для определения температурного поля внутри бетонного изделия характеризует закон распределения температуры бетона в начальный момент времени ($\tau = 0$), которое принято равномерным (3):

$$t_{\text{б}} = \text{const}. \quad (3)$$

Граничное условие (пространственное краевое условие) для определения температурного поля внутри бетонного изделия в любой момент времени характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью бетона и поверхностью гелиокамеры.

Количество тепла, передаваемого в единицу времени с единицы поверхности бетона в результате конвективного теплообмена, прямо пропорционально разности температур между поверхностью гелиокамеры и бетонного изделия (граничное условие третьего рода):

$$q_k(\tau) = h_k [t_m(\tau) - t_6(\tau)], \quad (4)$$

где h_k — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(°С · м²).

Конвективный теплообмен между поверхностью гелиокамеры и бетона описывается критериальной зависимостью [3]:

$$Nu = 0,54(Gr Pr)^{0,25}, \quad (5)$$

где Gr — критерий Грасгофа; Pr — критерий Прандтля.

Конвективный коэффициент теплообмена находим из выражения (5) для критерия Нуссельта:

$$h_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{в.п}}{\delta_{в.п}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{в.п}$ — коэффициент теплопроводности воздуха внутри гелиокамеры Вт/(°С м²); $\delta_{в.п}$ — толщина воздушной прослойки между бетонным изделием и поверхностью гелиокамеры, м.

Изменение температуры тепловоспринимающего материала гелиокамеры за время $\Delta\tau$ равно

$$\Delta t_m = t_m(\tau + \Delta\tau) - t_m(\tau) = \frac{Q_{пол}(\tau + \Delta\tau)}{V_m \rho_m c_m}, \quad (7)$$

где V_m, ρ_m, c_m — объем, плотность и теплоемкость тепловоспринимающего материала, м³; $Q_{пол}(\tau + \Delta\tau)$ — полезная энергия, полученная тепловоспринимающим материалом гелиокамеры за время $\Delta\tau$, которая определяется из уравнения энергетического баланса, имеющим вид

$$Q_{пол}(\tau + \Delta\tau) = Q_{погл}(\tau + \Delta\tau) - Q_{пот}(\tau + \Delta\tau), \quad (8)$$

где $Q_{погл}$ — солнечная энергия, поглощенная горизонтальной и вертикальными тепловоспринимающими поверхностями гелиокамеры, при теплоизоляции стены, ориентированной на север, которая равна

$$Q_{погл} = Q_{погл}^Г + (Q_{погл}^В)_{вост} + (Q_{погл}^В)_{зап} + (Q_{погл}^В)_{южн}. \quad (9)$$

Солнечная энергия, поглощенная поверхностью тепловоспринимающего материала за время $\Delta\tau$, определяется выражением

$$Q_{\text{погл}}(\tau + \Delta\tau) = F_{\text{м}} \cdot \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} R_{\text{н}}(\tau) \cdot (\kappa_{\text{огр}} \alpha_{\text{м}})_{\text{эфф}} d\tau, \quad (10)$$

где $F_{\text{м}}$ — площадь поверхности тепловоспринимающего материала, м^2 ; $R_{\text{н}}(\tau)$ — мощность потока солнечного излучения, поглощенного поверхностью тепловоспринимающего материала гелиокамеры площадью 1 м^2 в период солнечного сияния, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В связи с небольшой толщиной металлической емкости гелиотехнического устройства, высокой плотностью и теплопроводностью металла принимаем температуру тепловоспринимающего материала одинаковой во всех точках емкости.

Тепловые потери в окружающую среду через прозрачное ограждение гелиокамеры, при условии теплоизоляции стены, ориентированной на север, за время $\Delta\tau$, равны

$$Q_{\text{пот}}(\tau + \Delta\tau) = F_{\text{кр}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} q_{\text{пот}}^{\text{кр}}(\tau) d\tau + F_{\text{ст}}^{\text{огр}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} q_{\text{пот}}^{\text{огр}}(\tau) d\tau + F_{\text{ст}}^{\text{из}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} q_{\text{пот}}^{\text{из}}(\tau) d\tau, \quad (11)$$

где $F_{\text{кр}}$, $F_{\text{ст}}^{\text{огр}}$, $F_{\text{ст}}^{\text{из}}$ — площадь крыши, стен с прозрачным ограждением и теплоизолированной стены гелиокамеры, м^2 .

Поток тепла через единицу площади поверхности прозрачного ограждения боковых стен и крыши гелиокамеры определяется выражением

$$q_{\text{пот}}^{\text{огр}}(\tau) = U_{\text{пот}}^{\text{огр}} [t_{\text{м}}(\tau) - t_{\text{о}}(\tau)], \quad (12)$$

где $t_{\text{о}}$ — температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; $U_{\text{пот}}^{\text{огр}}$ — коэффициент тепловых потерь через прозрачное ограждение, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C м}^2)$.

Поток тепла через единицу площади поверхности теплоизолированной стены гелиокамеры равен

$$q_{\text{пот}}^{\text{из}}(\tau) = U_{\text{пот}}^{\text{из}} [t_{\text{м}}(\tau) - t_{\text{о}}(\tau)], \quad (13)$$

где $U_{\text{пот}}^{\text{из}}$ — коэффициент теплопередачи теплоизолированной стены гелиокамеры, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C м}^2)$.

Тепловые потери через прозрачное ограждение гелиокамеры обусловлены теплообменом конвекцией и излучением с окружающей средой. Тепловые потери через теплоизолированную стену гелиокамеры зависят прежде всего от толщины и теплопроводности материала теплоизоляции.

Соотношение (4) справедливо только при постоянной температуре $t_{\text{б}}$, однако в случае конвективного теплообмена его можно принять в качестве граничного условия как расчетную схему первого приближения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г.* Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. — М.: Стройиздат, 1973. [*Zasedatelev I.B.* Тепло- i massopere-nos v betone special promyshlennykh sooruzhenij. — М.: Strojizdat, 1973.]
- [2] *Коротеев Д.Д.* Организационно-технологическое обеспечение производства железобетонных изделий в полигонных условиях с использованием солнечной энергии: Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2011. [*Koroteev D.D.* Organizatsionno-tekhnologičeskoe obespethe-nie proizvodstva ferro-betonnykh izdelij v poligonnykh uslovijakh s ispolzovaniem solneth-noj energii: Diss. ... kand. tkh. nauk. — М., 2011.]
- [3] *Подгорнов Н.И.* Термообработка бетона с использованием солнечной энергии. — М.: Издательство АСВ, 2010. [*Podgornov N.I.* Termoobrabotka betona s ispolzovaniem sol-nethnoj energii. — М.: Izdatelstvo ASW, 2010.]

THE MATHEMATICAL FORMULATION OF THE DETERMINATION CONCRETE'S TEMPERATURE PROBLEM DURING HEAT TREATMENT IN HELIOKAMERA AS THE «HOT BOX»

N.I. Podgornov, D.D. Koroteev

The department of building production
Moscow state academy of municipal economy and building
Kalitnikovskaja srednjaja str., 30, Moscow, Russia, 109029

The mathematical description of thermophysical processes of formation concrete's temperature field during heat treatment with using solar energy is given. Single-valuedness conditions for differential equation solution thermal conduction are formulated. Heat treatment is realized in heliokamera working according to the «hot box» principle. The scheme, constructional peculiarities and technological preferences of heliotechnical devices as the «hot box» are given.

Key words: solar camera, beton, solar energy.