

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Н.И. Подгорнов, Д.Д. Коротеев

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

Рассматриваются теплофизические процессы, протекающие в бетоне при его термообработке с использованием солнечной энергии. Приводится методика оценки целесообразности применения солнечной энергии для тепловой обработки железобетонных изделий.

Ключевые слова: теплофизические процессы, тепловая обработка.

Начиная со второй половины XX столетия в нашей стране проводились исследования, экспериментально доказавшие целесообразность использования солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий [1; 2]. В ходе этих исследований разработаны различные гелиотехнические теплоэнергетические установки и устройства, простейшим из которых является опалубочная форма, оснащенная рамой с прозрачным покрытием. Такое гелиотехническое устройство по своему конструктивному решению и теплофизическим процессам, протекающим в нем, схоже с плоским низкопотенциальным нагревателем, коллектором с той лишь разницей, что теплоприемником в опалубочной форме служит твердеющий бетон [3].

Основными критериями эффективности того или иного метода тепловой обработки железобетонных изделий являются затраты энергии на термообработку и показатели прочности бетона после нее, а также сроки изготовления изделий. Продолжительность технологического цикла изготовления железобетонных изделий на открытых летних полигонах при использовании теплового воздействия на бетон не превышает суточной оборачиваемости опалубочных форм. При твердении изделий в естественных условиях без тепловой обработки продолжительность определяется временем набора бетоном распалубочной прочности.

Критерием эффективности применения солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий является набор бетоном распалубочной прочности при сохранении суточного оборота форм. Методы определения ожидаемой прочности железобетонных изделий основаны на использовании зависимости прочности бетона от его температурно-временной характеристики, в качестве которой используется показатель зрелости или приведенный возраст [4].

Прогнозирование прочности железобетонных изделий, твердеющих в гелиотехнических устройствах, возможно лишь при установлении закономерностей тепло- и массообменных процессов, протекающих в них, и решении соответствующей теплофизической задачи распределения температуры изделий во времени. Такая теплофизическая задача решена авторами для гелиотехнического устрой-

ства типа плоского коллектора, которым является опалубочная форма, оснащенная рамой с прозрачным покрытием.

Основное влияние на формирование температурного режима в бетоне при твердении его в опалубочной форме, оснащенной рамой с прозрачным покрытием, оказывают: солнечная радиация, поглощенная бетоном в период солнечного сияния (1)

$$Q_{\text{погл}} = F_6 \cdot \int_{T_c} R_h^{\text{погл}}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где T_c — продолжительность солнечного сияния, ч.; F_6 — площадь солнцеспринимающей поверхности железобетонного изделия, м^2 ; $R_h^{\text{погл}}$ — мощность потока солнечной радиации, поглощенного поверхностью железобетонного изделия площадью 1 м^2 , $\text{Вт}/\text{м}^2$;

теплота, выделенная вследствие экзотермии цемента, (2)

$$Q_{\text{экз}} = V_6 \cdot P_{\text{ц}} \cdot \int_{T_{24}} \mathcal{E}_{\text{ц}}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где V_6 — объем железобетонного изделия, м^3 ; $P_{\text{ц}}$ — удельный расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\mathcal{E}_{\text{ц}}(\tau)$ — удельное тепловыделение цемента, $\text{кДж}/\text{кг}$; зависящее от вида цемента, температурного режима и времени твердения;

тепловые потери в окружающую среду (3)

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}^{\text{о.ф}} + Q_{\text{пот}}^{\text{п.о}}. \quad (3)$$

Тепловые потери складываются из потерь через дно и боковые стенки опалубочной формы (4) и прозрачное ограждение (5):

$$Q_{\text{пот}}^{\text{о.ф}} = F_{\text{дна}} \cdot \int_{T_{24}} q_{\text{пот}}^{\text{дна}}(\tau) d\tau + F_{\text{стен}} \cdot \int_{T_{24}} q_{\text{пот}}^{\text{стен}}(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Потери через прозрачное ограждение обусловлены теплообменом, конвекцией и излучением, равны потоку энергии от бетона к прозрачному ограждению и далее в окружающую среду. Теплообмен происходит при испарении воды затворения из бетона в начальный период его твердения и обусловлен разностью парциального давления у поверхности бетона и в воздушной прослойке, а также капельной конденсации образующейся на внутренней поверхности прозрачного ограждения:

$$Q_{\text{пот}}^{\text{п.о}} = F_{\text{ог}} \cdot \int_{T_{24}} (t_6 - t_o) \cdot \left(\frac{1}{h_k^{\delta-n} + h_l^{\delta-n}} + \frac{1}{h_k^{n-o} + h_l^{n-o}} \right)^{-1} + \left[\kappa_{\text{сп}} \cdot \varepsilon_6 \cdot \sigma \cdot (T_6^4 - T_s^4) \right] d\tau + \\ + F_k \cdot \int_{\tau_1^k}^{\tau_2^k} \left[R_h^{\text{прош}}(\tau) \cdot (1 - c_k) - \alpha_k(\tau) \cdot (t_b - t_n) - q_{6-s}(\tau) \cdot (1 - c_k^{\text{инф}}) \right] d\tau \quad (5)$$

В начале процесса термообработки железобетонного изделия в гелиотехническом устройстве на температурное поле бетона оказывает влияние начальное распределение температуры. Затем, спустя определенный промежуток времени, наступает стационарное периодическое состояние, характеризующееся тем, что

температура в любой точке железобетонного изделия совершает гармоническое колебание с постепенно уменьшающейся амплитудой по мере удаления от поверхности бетона. Процесс распространения теплоты в бетоне носит волновой характер, и температура каждой точки железобетонного изделия в течение суток изменяется по закону простого гармонического колебания (6).

$$t(x, \tau) = t_{\text{cp}} + \Theta_{F \text{ max}} \cdot e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}} \cdot \cos\left(\frac{2\tau\pi}{T} - x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}\right), \quad (6)$$

где t_{cp} — среднее значение температуры бетона за период T , °С.

Время запаздывания температурной волны для заданной глубины, показывающее, насколько позднее на глубине x температура бетона примет свое максимальное значение относительно максимального значения на поверхности, прямо пропорционально корню квадратному из периода колебания температуры (7).

$$\Delta\tau = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}. \quad (7)$$

Для оптимизации прогнозирования прочности железобетонного изделия по его температурно-временной характеристике в приложении Microsoft Excel создана программа расчета температуры бетона во времени. Исходными данными для расчета являются климатические характеристики района производства изделий, размеры и вид изделий, конструктивные параметры гелиотехнического строительства. Результатами расчета являются температура изделия, количество теплоты, полученное бетоном вследствие экзотермии цемента и воздействия солнечной радиации, тепловые потери и другие теплофизические показатели.

Апробация результатов исследований прошла в полигонных условиях различных регионов нашей страны, в том числе на территории Московской области. Отклонения показателей зрелости бетона после суток твердения в теоретических расчетах и экспериментальных исследованиях не превышают 3 градусо-часов, что подтверждает достоверность созданной авторами математической модели развития тепло- и массообменных процессов в бетоне, твердеющем в гелиотехническом устройстве типа плоского коллектора (рис.).

В начале твердения железобетонного изделия происходит его нагрев, достигающий 3—4 °С/ч., за счет перехода в теплоту солнечной радиации, поглощенной поверхностью бетона с достаточно высоким коэффициентом поглощения ($\alpha_6 = 0,65$) и теплоты, выделенной за счет гидратации цемента. Теплота экзотермической реакции гидратации цемента составляет около 55% от общего количества теплоты, полученного изделием за первые сутки твердения; во вторые сутки интенсивность тепловыделения бетона уменьшается и составляет 45% от общего количества теплоты, полученной изделием за вторые сутки твердения. В ночные часы происходит медленное остывание изделия за счет тепловых потерь через прозрачное ограждение, дно и боковые стены опалубочной формы, достигающее своего максимального значения в период минимальных значений температуры наружного воздуха.

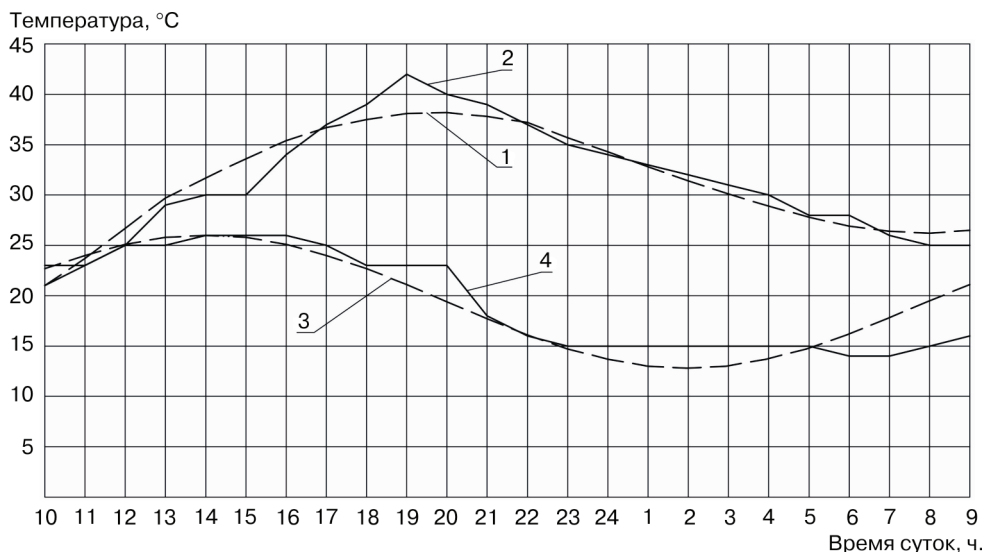


Рис. Температура бетона, твердеющего на территории Московской области в середине июля:

1 — расчетная температура в середине бетонного изделия; 2 — температура в середине бетонного образца в экспериментальных исследованиях; 3 — расчетная температура наружного воздуха; 4 — фактическая температура наружного воздуха

Для Московского региона расчетные значения зрелости бетонных образцов $30 \times 30 \times 30$ (h) см, марка бетона М300, после суток твердения в летние месяцы составляют 760—810 градусо-часов, прогнозируемая прочность — 49—51% R_{28} . В мае и сентябре зрелость бетона составляет 630—700 градусо-часов, прогнозируемая прочность 41—46% R_{28} . Таким образом, изделия в течение пяти месяцев набирают распалубочную прочность при суточном обороте форм.

Годовая экономия органического топлива равна количеству теплоты, полученному бетоном в гелиотехнических устройствах за период эффективного использования солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий, в Московском регионе составившего пять месяцев (8):

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{май}} + Q_{\text{июнь}} + Q_{\text{июль}} + Q_{\text{авг}} + Q_{\text{сент}} \quad (8)$$

Для Московского региона годовая экономия органического топлива при использовании солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий в течение пяти месяцев составляет 165 кг условного топлива с 1 м^2 гелиотехнического устройства. Соответственно, для полигона мощностью 5 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ она составляет от 33 до 82,5 т условного топлива.

Определение кинетики набора прочности бетона по его температурно-временной характеристике на основании созданной авторами математической модели и программы расчета развития тепло- и массообменных процессов в бетоне, твердеющем в гелиотехническом устройстве, позволяет оценить целесообразность использования солнечной энергии для термообработки железобетонных изделий различной номенклатуры в любых климатических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Подгорнов Н.И., Коротеев Д.Д.* Теплоэнергетические системы и установки для термообработки бетона в условиях открытых полигонов с использованием солнечной энергии // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». — 2009. — № 3/23(555).
- [2] *Подгорнов Н.И., Коротеев Д.Д.* Теплоаккумулирующие и комбинированные энергетические системы и установки для термообработки бетона с использованием солнечной энергии // Известия ОрелГТУ. Строительство и реконструкция. — 2009. — № 4/24(572).
- [3] *Подгорнов Н.И., Анпарович Т.В., Коротеев Д.Д.* Термообработка бетона в опалубочных формах с использованием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2009. — № 6.
- [4] Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / Под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. — М., 2005.

ENERGY APPRECIATION OF EMPLOYMENT OF SOLAR ENERGY FOR HEAT-PROCESSING OF CONCRETE PRODUCTS

N.I. Podgornov, D.D. Koroteev

Moscow state academy of municipal economy and building
Average Kalitnikovskaya str., 30, Moscow, Russia, 109029

Thermophysical processes are considered, taking place in concrete during heat-processing it with employment of solar energy. The method of appreciation of reasonability of employment of solar energy for heat-processing of concrete products is given.

Key words: thermophysical processes, heat-processing.