

УДК 004.942:004.932.2

Проаналізовані теплові процеси, які виникають при підігріві бетону, який твердіє на морозі. Побудована математична модель процесів, що використовується в проектуванні та управлінні для оптимізації витрат електроенергії на підігрів. Точність запропонованої моделі підтверджена експериментально шляхом порівняння результатів розрахунків з даними, отриманими прямим і непрямим вимірюванням температурних полів

Ключові слова: бетон, що твердіє на морозі, внутрішні джерела тепла, моделювання температурних полів

Проанализированы тепловые процессы, возникающие при подогреве бетона, затвердевающего на морозе. Построена математическая модель процессов, используемая в проектировании и управлении для оптимизации расходов электроэнергии на подогрев. Точность предложенной модели подтверждена экспериментально путем сравнения результатов расчета с данными, полученными прямым и косвенным измерением температурных полей

Ключевые слова: затвердевающий на морозе бетон, внутренние источники тепла, моделирование температурных полей

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ НАГРЕВА ТВЕРДЕЮЩЕГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Ю. В. Шихирева*

E-mail: dvl5@ukr.net

Г. А. Оборский

Доктор технических наук, профессор**

E-mail: rector@opu.ua

О. С. Савельева

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра нефтегазового и химического машиностроения***

Кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации*

Одесский национальный политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

E-mail: okssave@gmail.com

1. Введение

Температурная зависимость характеристик материалов, скорости и направления химических и физических процессов привела к тому, что многие современные производства располагаются в специальных помещениях с кондиционированной средой и реализуются в термостабильных условиях. К сожалению, этого нельзя сказать о строительстве, которое зачастую ведется под открытым небом и круглый год, а значит, и в условиях, когда температура окружающей среды опускается ниже нуля, что приводит к замерзанию бетонной смеси. От этого в первую очередь страдают основные химические процессы в строительстве, такие как твердение бетона, от которого, в свою очередь, зависит основная характеристика строительной конструкции – прочность.

Существует много способов предотвратить замерзание бетона на морозе: предварительный подогрев, утепление, введение тепловыделяющих добавок, подогрев электрическим током после формирования изделий и др. [1]. Однако все они из-за больших объемов и сложности строительных конструкций энергоемки и труднореализуемы, что предъявляет особые требования к проектированию таких процессов и управлению их течением.

Поэтому исследование, направленное на снижение энергозатрат при проектировании и управлении процессом подогрева бетонных конструкций, укладываемых на морозе, является весьма актуальным.

2. Постановка проблемы

Основным компонентом и основной средой, в которой происходит медленное затвердевание бетона, является вода. Отсюда следует основное условие воздействия на бетон после заполнения соответствующей опалубки: недопущение преждевременного замерзания или испарения воды.

Цель подогрева состоит не только в том, чтобы «ввести» энергию в бетон, необходимо добиться *равномерного распределения* этой энергии в изделии. Можно сказать, что, чем равномернее температура в бетоне, тем меньше потери энергии на перегрев отдельных его участков. С другой стороны равномерный нагрев бетонных строительных деталей и узлов по разным причинам (неравномерный подвод тепла, особенно при стержневых нагревателях, неравномерный сток тепла через сложные поверхности изделия, неравномерность и анизотропность теплофизических свойств

гетерогенной бетонной смеси) является практически недостижимым, а значит, потери тепла неизбежны.

Поэтому основной проблемой работников строительной индустрии на сегодняшний день является оптимизация энергетических затрат на разогрев застывающего бетона в зимнее время.

3. Анализ последних достижений и публикаций

При бетонировании в зимних условиях широко применяют подогрев смеси электрическим током [1]. По способу расположения в прогреваемой конструкции различают электроды внутренние (стержневые, струнные) и поверхностные (нашивные, плавающие). Стержневыми электродами прогревают фундаменты, балки, прогоны, колонны, монолитные участки узлов пересечений сборных и других конструкций. При таком способе нагрева основным преимуществом является максимально эффективное использование энергии, так как она подводится внутрь нагреваемого изделия, а основным недостатком – принципиальная невозможность равномерного прогрева железобетонных деталей. Из этого следует, что проектирование процесса подогрева бетона во многом сводится к решению оптимизационных задач [2], в основе которых нелинейные соотношения, вытекающие из дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [3, 4] и сложных начальных и граничных условий теплообмена в реальных гетерогенных системах [5].

Задача усложняется также тем, что обычные схемы подогрева бетонных изделий предполагают одновременное наличие в объекте нескольких источников и стоков тепла разных типов и формы. Кроме того, бетон отличается существенной пространственной и временной неоднородностью нагреваемой среды, которая состоит из твердых пород с размерами разных порядков (гравий, песок), и постоянно физически и химически убывающей воды [6].

В качестве факторов, облегчающих расчеты, можно привести принципы элементарной и сложной суперпозиции, а также принцип симметрии, снижающие размерность решаемых задач. Если действия отдельных источников тепла, расположенных на границе тела или внутри него, не зависят друг от друга, то можно рассматривать каждый источник отдельно, а конечный тепловой эффект находить, складывая алгебраически действия всех источников. Кроме того, можно и действие отдельного источника определять как сумму любой комбинации источников, расположенных на том же месте и имеющих в сумме ту же температуру или интенсивность, что и исходный источник (принцип элементарной суперпозиции ПЭС).

ПЭС применим во всех случаях, когда граничные условия, внутренние источники и теплофизические характеристики (теплоемкость c , плотность ρ , коэффициент температуропроводности a и тепловые потоки q) не зависят от температуры тела.

Напротив, ПЭС *неприменим* в случае, если какие-либо условия решения задачи (условия однозначности) существенно зависят от температуры, а дифференциальное уравнение Фурье, на котором основаны тепловые расчеты, становится нелинейным.

Так как абсолютные значения и перепады температур в случае нагрева реальных водных смесей невелики (0–50 °С), можно считать, что условия применения ПЭС выполняется, и теплофизические свойства бетона не зависят от температуры. Однако они существенно зависят от времени из-за постоянного изменения физического состояния и химического состава гетерогенной среды.

Суперпозиция при симметричном расположении источников основывается на том, что плоскость симметрии оказывается адиабатической плоскостью – через нее тепловой поток не проходит. Это объясняется тем, что симметричные точки тела находятся в одинаковых условиях и имеют, поэтому в каждый момент времени одинаковую температуру. Это справедливо также и для пар точек, находящихся в непосредственной близости от плоскости симметрии; следовательно, градиент температуры здесь равен нулю и тепловой поток не возникает. Поэтому тепло не переходит из одной полубесконечной области в другую и в каждой из этих областей нагрев (охлаждение) происходит только за счет работы источников, расположенных в них. Температура плоскости симметрии изменяется во времени и, если задача не одномерная, в различных точках не одинакова.

Таким образом, если при проектировании нагрева обеспечить симметричное расположение источников тепла, то можно при решении задачи рассматривать не все тело и действие не всех источников, а лишь часть тела, заменив влияние других частей тела и расположенных там источников изотермическими или адиабатическими границами. Во всех этих случаях достаточно исследовать одну часть тела, так как остальные части имеют тот же (симметричный) тепловой режим [7].

4. Цель и задачи исследования

Цель исследования – снижение энергозатрат за счет оптимального проектирования и управления технологическими процессами, использующими интенсивный нагрев железобетонных изделий в строительстве.

Задачи исследования – анализ причин потери энергии при электроподогреве бетона внутренними источниками тепла, построение математической модели процессов теплообмена при таком способе нагрева и экспериментальная проверка созданной модели.

5. Построение физической и математической моделей процесса нагрева и экспериментальная проверка их точности

Физическая модель. Пусть нагреватели в виде параллельных стержней располагаются внутри бетонной плиты толщиной h на глубине $h/2$ от ее поверхностей (рис. 1):

– на бесконечном удалении от источника температура равна начальной температуре $T|_{y=\infty} = T$ (граничное условие для источника тепла);

– на поверхности бетонной плиты задан тепловой поток $-\lambda \frac{dT}{dy}|_{y=0} = Q_n$ (граничное условие для стока тепла);

- на бесконечном удалении от поверхности бетонной плиты тепловой поток равен нулю $\frac{dT}{dy}|_{y=\infty}=0$ (граничное условие для стока тепла);
- на бесконечном удалении от поверхности бетонной плиты температура постоянна $T|_{y=\infty}=T_0$ (граничное условие для стока тепла).

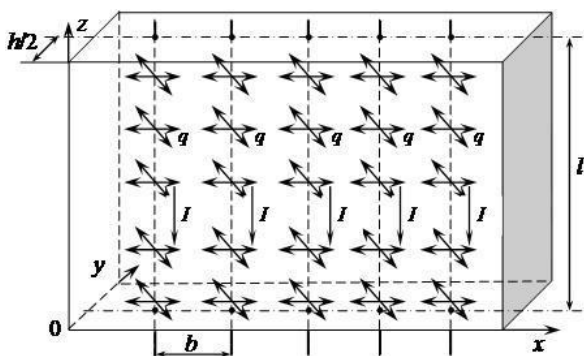


Рис. 1. Схема расположения источников тепла в железобетонном изделии

Математическая модель была создана для поиска оптимальных решений при расчетах таких значений расстояний между стержнями нагревателя b , диаметра стержней d и электрического тока в нагревателях I , которые доставляли бы минимум целевой функции – затратам электроэнергии Q на нагрев бетонной плиты:

$$\min_s \{Q(s)\}, \quad s \in S, \tag{1}$$

где все возможные для этой задачи векторы решений $s = (b, d, I)$ относятся к непустой области определения S , при ограничениях на среднюю температуру поверхности плиты T_{cp} и разницу температур у наиболее «горячей» и наиболее «холодной» точек этой поверхности ΔT :

$$T_{cp \min} \leq T_{cp} \leq T_{cp \max}; \tag{2}$$

$$\Delta T \leq \Delta T_{\max}. \tag{3}$$

Для решения задачи оптимизации (1)–(3) любым из существующих методов [2, 8] были построены расчетные теплофизические схемы, основывающиеся на следующих предположениях:

- в железобетонной плите действуют линейные непрерывные источники тепла $q|_{r \geq 0, r=0} = q_L$ в виде стержневых электродов диаметром d , выполненных из материала с высоким удельным сопротивлением ρ (рис. 2);
- начальная температура бетонной плиты в любой ее точке одинакова $T|_{\tau=0} = T_0$ (начальное условие);

Применяя принцип симметрии, сведем задачу к двумерной и оставим в рассмотрении только один первый квадрант сечения, перпендикулярного оси нагревателя (рис. 3).

На рис. 2 приведено действие одного источника (стержень системы подогрева) и одного стока (наружная поверхность плиты) тепла, их суммарное действие в соответствии с ПЭС описывается алгебраической суммой

$$T_{y=h}(x) = T_B(x) + T_H, \tag{4}$$

где $T_{y=h}(x)$ – температура вдоль поверхности плиты; $T_B(x)$ – «вклад» в температуру поверхности внутреннего теплового потока; T_H – «вклад» в температуру поверхности наружного стока тепла.

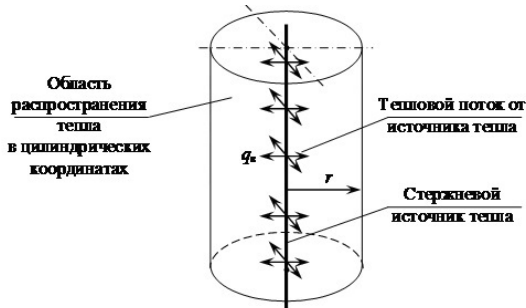


Рис. 2. Расчетная схема действия стержневого источника тепла

Расчетная схема нагрева бетонной плиты в этом случае имеет вид, представленный на рис. 3.

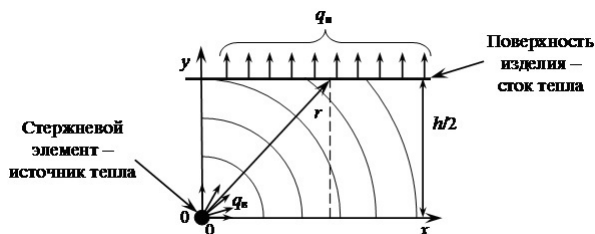


Рис. 3. Расчетная схема нагрева бетонной плиты при одном стержневом источнике и одном поверхностном стоке тепла

Введем в рассмотрение второй источник тепла – стержень и рассмотрим получающуюся при этом картину распределения тепла в объекте (рис. 4).

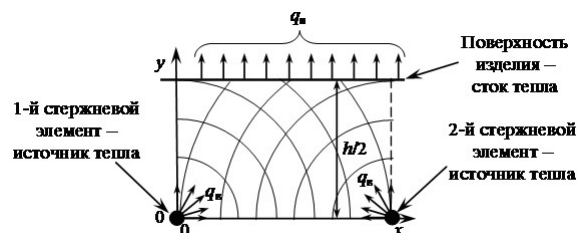


Рис. 4. Расчетная схема нагрева бетонной плиты при двух стержневых источниках и одном поверхностном стоке тепла

Распределение температуры вдоль поверхности $T_{y=h}(x)$ в этом случае описывается алгебраической суммой

$$T_{y=h}(x) = T_{B1}(x) + T_{B2}(x) + T_H, \tag{5}$$

у которой индексы 1 и 2 относятся к номерам нагревателей.

Слагаемые (5) рассчитывали в соответствии с формулами для внутреннего линейного непрерывного источника тепла и плоского непрерывного поверхностного стока тепла.

Так, для внутренних источников тепла:

$$T_b(x) = T_0 + \theta \frac{q_b(I, d, \rho)}{\lambda}, \quad (6)$$

где $\theta = -\frac{1}{4\pi} E_i\left(-\frac{1}{4Fo}\right)$; $Fo \equiv \frac{a\tau}{r^2}$; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; $r = \sqrt{x^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}$;

Fo – критерий Фурье (безразмерное время); $q_b(I, d, \rho)$ – тепловой поток от внутреннего источника тепла; a – коэффициент температуропроводности бетона; r – цилиндрическая координата; λ – коэффициент теплопроводности бетона; c – плотность бетона; τ – время.

Функция $E_i(u) = \int_{-\infty}^u \frac{e^{-\xi}}{\xi} d\xi$ называется интегральной

показательной функцией. Для компьютерных расчетов функцию раскладывали в ряд:

$$E_i(u) = C + \ln(-u) + u + \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} + \dots, \quad (7)$$

где $C = 0,577216\dots$ – постоянная Эйлера.

Для наружных стоков тепла имеют место соотношения:

$$T_n = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q(\alpha)\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda c \rho}}, \quad (8)$$

где $q(\alpha)$ – тепловой поток от поверхности бетона наружу (сток тепла); α – коэффициент теплоотдачи на поверхности.

Решая (5) относительно s , находили те значения b, d и I , которые доставляют минимум целевой функции Q при выполнении ограничений (2) и (3). Задачу оптимизации решали методом наискорейшего спуска, изменяя на каждой итерации расчетные значения теплофизических свойств бетона λ, c, α и ρ , что моделировало их изменение по мере твердения последнего.

Для экспериментальной проверки точности предложенной модели тепломассопереноса была изготовлена лабораторная установка, представляющая собой деревянную опалубку 1 (рис. 5), в которую через теплоизоляторы в стенках вставляли нихромовые стержни 2, хромель-алюмелевые термопары 3 и заливали бетон 4.

Далее к нагревателям подводили переменное электрическое напряжение и фиксировали показания термопар, которые сравнивали с расчетными значениями температуры на поверхности плиты. Спаи термопар располагались вблизи поверхности над нагревателем и между соседними нагревателями.

Кроме прямого измерения температуры с помощью термопар, использовали также косвенное измерение с использованием тепловизора ТН 9100. Этот прибор позволяет накладывать на изображение, полученное в видимых лучах (рис. 5), изображение того же объекта, полученное в результате преобразования инфракрасных лучей (рис. 6). Кроме того, тепловизор этой

модели позволяет строить графики температур вдоль поверхности исследуемого объекта, что позволило получить дополнительное подтверждение точности принятых моделей теплообмена [9, 10].

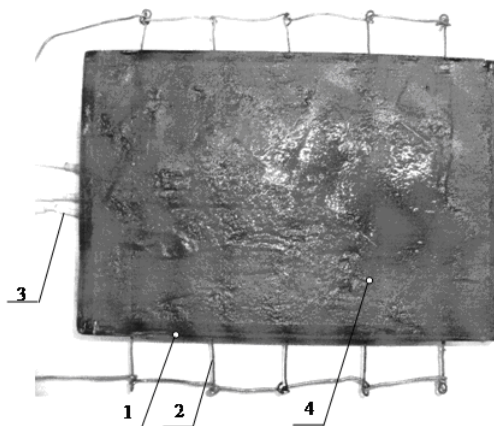


Рис. 5. Бетонная плита размером $0,5 \times 0,3 \times 0,1$ м непосредственно после заливки жидкой бетонной смеси в опалубку: 1 – деревянная опалубка; 2 – нихромовые нагреватели, установленный в электро и теплоизолирующих втулках; 3 – выводы хромель-копелевых термопар, установленных в характерных точках плиты; 4 – бетонная смесь

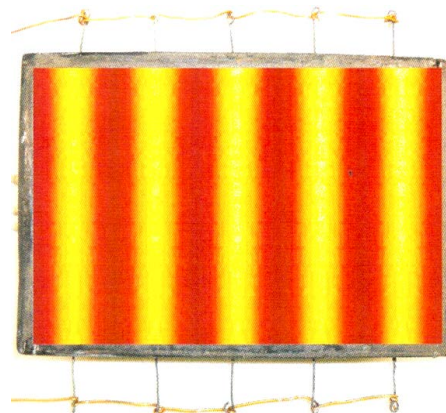


Рис. 6. Наложение изображения, полученного от системы «тепловизор – цифровая видеокамера», на изображение твердеющего в опалубке бетона

Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 7. Как видно из рисунка экспериментальные точки 2 и кривые 3 подтверждают достаточную для инженерно-строительных исследований точность использованных методов и моделей. Предложенные подходы легли в основу созданной в Одесском национальном политехническом университете системы измерений «INMER», предназначенной для неразрушающего контроля параметров тепловых процессов при затвердевании железобетона за счет обработки инфракрасных потоков от поверхности изделий.

Входящий в систему блок оптимизации позволил, например, при лабораторных испытаниях решить задачу минимизации расхода электроэнергии за счет расстояния между закладываемыми электродами и электрического тока в них.

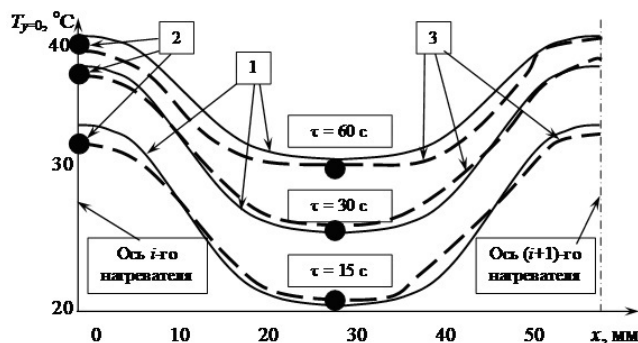


Рис. 7. Распределение температуры:
 1 — вдоль поверхности подогреваемой бетонной плиты, полученное расчетом; 2 — прямым измерением терпарами; 3 — косвенным измерением с помощью тепловизора

6. Выводы

При затвердевании бетона на морозе осуществляется его подогрев. Эта операция требует тщательного проектирования методов и средств технологии последнего, т.к. неравномерное распределение температуры является основной причиной потери энергии, в частности, при электроподогреве бетона внутренними источниками тепла.

Важнейшими этапами проектирования и управления технологией и оборудованием для подогрева бетона электрическим током являются оптимизационные расчеты параметров конструкции с внутренними нагревателями, а также силы тока, используемого в нагревательных элементах. Для этого в работе построена математическая модель процессов теплообмена при таком способе нагрева и выполнена экспериментальная проверка созданной модели.

Литература

1. Уход за твердеющим бетоном [Электронный ресурс] / Режим доступа: <<http://woodroads.ru/tehnologiya-stroitelstva-pokrytii/82-uhod.html>>. – 06.05.12.
2. Шоробура, Н. Н. Решение задач многокритериальной оптимизации сложных объектов и систем [Текст] / Н. Н. Шоробура // ДонНТУ. – Режим доступа: http://www.masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf. – 14.09.2013.
3. Petrov, N. New approach to the non-classical heat conduction [Text] / N. Petrov, A. Szekeres // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, 2008, vol. 38, No. 3, pp. 61-70.
4. Иванова, Л. А. Исследование теплового режима стержня с теплофизической защитой [Текст] / Л. А. Иванова, А. А. Бондарь // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск. – 2007. – № 2. – С. 28 – 30.
5. The experimental and numerical investigation of the solidification of a porous ceramic casting / F. Kavicka, J. Dobrovská, K. Stránský, B. Sekanina, J. Stetina / Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 3, 023002 (2012) // ISSN: 2151-8629.
6. Арбеньев, А. С. Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроподогревом смеси [Текст] / А. С. Арбеньев // Промышленный вестник. – 1998. – № 6 – 7. – С. 8 – 12.
7. Становський, О. Л. Использование четырехмерной симметрии пространства-времени при электрическом моделировании тепловых процессов [Текст] / О. Л. Становський, Т. В. Лисенко, А. С. Балан // Наукові праці Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова. – 2003. – № 3. – С. 48 – 51.
8. Алмаметов, В. Б. Моделирование нестационарных тепловых полей электрорадиоэлементов [Текст] / В. Б. Алмаметов, А. В. Авдеев, А. В. Затылкин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Том 2. – Пенза, 2010. – С. 16 – 22.
9. Оборский, Г. А. Метод измерения тепловых параметров затвердевания бетона по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [Текст] / Г. А. Оборский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наук. праць. – 2013 – Вип. 1(2). – С. 33 – 40.
10. Оборский, Г. А. Измерение параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали [Текст] : зб. наук. праць / Г. А. Оборский, В. М. Рязанцев, Ю. В. Шихирева // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013. – Вип. 8. – С. 124 – 132.