

УДК 004.045:004.932

**Т.П. Становская\***, **М.А. Духанина\*\***, **Ю.В. Шихирева\*\***

\* Одеська національна академія харчових технологій, навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С.Мартинівського, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65026

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

**ИНФРАКРАСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ БЕТОНА***Для оценки состояния бетонных деталей при их затвердевании предложено использовать инфракрасную видеосъемку внешней поверхности детали с последующим параболическим преобразованием полученного при этом видеопотока.***Ключевые слова:** Бетон – Затвердевание – Тепловые процессы – Параболическое преобразование*For the assessment of concrete details condition at their hardening it is offered to use infrared video filming of an external surface of a detail with the subsequent parabolic transformation of the received video stream.***Keywords:** Concrete - Hardening - Thermal processes - parabolic transformation**I. ВВЕДЕНИЕ**

Современные предприятия строительной индустрии остро нуждаются в экспресс-методах измерения параметров технологического процесса, например, температурных полей в массиве твердеющего бетона. Действительно, после укладки и уплотнения бетонной смеси осуществляется уход за твердеющим бетоном, представляющий комплекс мероприятий, обеспечивающих благоприятные условия твердения уложенной смеси. Мероприятия включают предупреждение испарения из бетона влаги, а также предохранение его от механических повреждений в раннем возрасте. Для этого при твердении бетона в начальный период необходимо создавать благоприятные температурно-влажностные условия, обеспечивающие нормальное протекание процессов структурообразования. Температура должна быть положительная, желательно, в пределах 30 – 35 °С.

Как правило, такие скрытые данные крайне сложно получить прямым измерением, поэтому для «зрячего» управления температурным режимом приходится довольствоваться косвенными характеристиками, полученными путем оценки зависимых физико-химических процессов и явлений с последующей интеллектуальной обработкой для извлечения полезной информации из неполного и зашумленного источника.

**II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Рассмотрим в качестве объекта управления технологический процесс изготовления строительных деталей и монолитных железобетонных конструкций. После формирования изделия основным параметром, влияющим на качество будущего объекта, является интенсивный внутренний теплообмен от электрических источников теп-

ла, о течении которого можно судить только косвенно – по температуре внешней поверхности строительной детали.

Такой подход обладает, по крайней мере, четырьмя существенными недостатками:

– во-первых, для визуализации распределения температуры по поверхности детали необходимо пользоваться специальными приборами – тепловизорами, т.к. электромагнитное излучение от остывающего бетона формы всегда находится вне пределов видимого спектра;

– во-вторых, фотография, полученная с помощью тепловизора, из-за неизбежного преобразования “3D-деталь – 2D-изображение” содержит существенные искажения, и по ней трудно судить о состоянии объекта измерения на момент фотографирования;

– в-третьих, одиночная фотография малоинформативна, т.к. для правильной оценки термической ситуации развитие процесса гораздо важнее любого его текущего состояния;

– в-четвертых, параметры источника нагрева крайне нестабильны от одного изделия к другому: геометрия простановки нагревательных элементов, как правило, не выдерживается, параметры электрического тока не контролируются, что приводит к неравномерному нагреву, а значит, – к наличию «перегретых» и «недогретых» участков.

**III. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Как известно, бетон является искусственным камнем, получаемым в результате твердения рационально подобранной смеси цемента, воды и заполнителей. Согласно современным представлениям, образование и твердение цементного камня проходят через стадии формирования коагуляционной и кристаллических структур.

В стадии образования коагуляционной (связной) структуры вода, обволакивая мелкодисперсные частицы цемента, образует вокруг них так называемые сольватные оболочки, которыми частицы сцепляются друг с другом. По мере гидратации цемента процесс переходит в стадию кристаллизации. При этом в цементном тесте возникают мельчайшие кристаллы, превращающиеся затем в сплошную кристаллическую решетку. Этот процесс кристаллизации и определяет механизм твердения цементного камня и, следовательно, нарастания прочности бетона [1].

Ускорение или замедление процесса образования и твердения цементного камня зависит от температуры смеси и адсорбирующей способности цемента, определяемой его минералогическим составом. Для твердения цементного камня наиболее благоприятная температура от 15 до 25 °С, при которой бетон на 28-е сутки практически достигает стабильной прочности. При отрицательных температурах вода, содержащаяся в капиллярах и теле, замерзая, увеличивается в объеме примерно на 9 %.

По способу расположения в прогреваемой конструкции различают электроды внутренние (стержневые, струнные) и поверхностные (нашивные, плавающие). Стержневые электроды изготавливают из арматурной стали диаметром 6 – 10 мм. Их устанавливают через открытую поверхность бетона или отверстия в опалубке с выпуском на 10 – 15 см концов для подключения к сети. Стержневыми электродами прогревают фундаменты, балки, прогоны, колонны, монолитные участки узлов пересечений сборных и других конструкций.

Первая из перечисленных проблем решается с помощью использования тепловизоров современных моделей. Широкий рабочий температурный диапазон этих приборов (–40 – 2000 °С) и их высокая чувствительность (0,03 °С) позволяют проводить температурный мониторинг широкого класса строительных объектов: как при производстве железобетонных деталей на специализированных предприятиях, так в монолитном строительстве [2]. Важной функцией современного тепловизора является возможность получения фотографий на основе композитных видимых и инфракрасных излучений в различных сочетаниях, что облегчает анализ термограмм в случае сложных поверхностей объектов контроля.

Решение второй и третьей проблем находится в области интеллектуальных методов обработки видеоинформации [3]. Прежде всего, речь идет об использовании, вместо отдельных фотографий, видеопотока. Кроме того, необходимо расширять информационную базу метода за счет использования полноцветных видеопотоков, по крайней мере, в том виде, в котором их представляет тепловизор.

В основе решения четвертой проблемы тот факт, что при бетонировании в зимних условиях широко применяют изотермический прогрев смеси электрическим током [1], обладающим достаточной гибкостью как по величине, так и по месту выделения тепла.

#### IV. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Повышение эффективности управления технологическими процессами, использующими интенсивный нагрев железобетонных изделий, путем включения в контур обратной связи АСУ дополнительной информации, полученной в результате косвенного измерения температурных полей на поверхности изделий и дальнейшего параболического преобразования полноцветного видеопотока от тепловизора.

#### V. ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Как известно, сложный цвет элемента любого изображения (пикселя)  $z$  состоит из трех составляющих: красного, зеленого и синего цветов. Аналитически это обозначается как  $z = z(r, g, b)$ , где  $r, g, b$  — интенсивности соответственно красной, зеленой и синей составляющих элемента изображения с коэффициентами, полученными по правилу баланса белого, отражающего физиологические особенности нашего зрения.

$$z = 0,299r + 0,587g + 0,114b. \quad (1)$$

Разделим равномерно каждую составляющую на 256 градаций яркости: от 0 до 255. В результате, например, ярко-синий цвет в векторе  $(r, g, b)$  может быть определен как  $(0, 0, 255)$ , ярко-красный как  $(255, 0, 0)$ , ярко-фиолетовый –  $(255, 0, 255)$ , черный –  $(0, 0, 0)$ , белый –  $(255, 255, 255)$  и т.д.

Выделим в видеопотоке два смежных (соседних) цветных кадра 1 и 2 и применим к ним параболическое преобразование [3]. Как известно, для черно-белых изображений оно начинается с бинаризации двух избранных кадров. После разложения цветных кадров на три составляющие каждый результатом бинаризации являются уже шесть новых изображений, созданных из пикселей шести яркостей – максимальной и минимальной для каждого из трех цветов.

$$r'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} r_{xy} \geq r_b \\ r'_{xy} = 0 \end{array} \right| r_{xy} < r_b, \quad (2)$$

$$g'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} g_{xy} \geq r_b \\ g'_{xy} = 0 \end{array} \right| g_{xy} < g_b, \quad (3)$$

$$b'_{xy} = 255 \left| \begin{array}{l} b_{xy} \geq r_b \\ b'_{xy} = 0 \end{array} \right| b_{xy} < b_b, \quad (4)$$

где  $x, y$  – координаты пикселей двумерного начального и бинаризованных изображений;

$r_{xy}, g_{xy}, b_{xy}$  – цветовые яркости соответствующих пикселей начального изображения до бинаризации;

$r'_{xy}, g'_{xy}, b'_{xy}$  – цветовые яркости этих же пикселей после бинаризации;

$r_b, g_b, b_b$  – пороги бинаризации для отдельных цветовых составляющих.

Наличие для каждого элементарного цвета

двух кадров, отличающихся временем съемки, позволяет рассматривать видеопоток как трехмерное изображение, в котором, кроме традиционных для двумерных изображений координат, появляется третья координата – время. Рассмотрим общее параболическое уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = D_{xy} \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

и попытаемся интерпретировать его для цветного видеопотока.

В этом уравнении  $D_{xy}$  – некоторый коэффициент, который имеет конкретное значение для каждого конкретного  $x$ -го пикселя. Подставляя (1) в (5), получим для цветного видеопотока

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \tau} &= 0,299 \frac{\partial r}{\partial \tau} + 0,587 \frac{\partial g}{\partial \tau} + 0,114 \frac{\partial b}{\partial \tau} = \\ &= 0,299 D_{xyr} \left( \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} \right) + \\ &+ 0,587 D_{xyg} \left( \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) + \\ &+ 0,114 D_{xyb} \left( \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $D_{xyr}$ ,  $D_{xyg}$ ,  $D_{xyb}$  – коэффициенты, имеющие конкретные значения для цветовых составляющих пикселя.

Пусть  $x$ ,  $y$  и  $\tau$  интерпретируются теперь как дискретные пространственно-временные координаты некоторого  $x$ -го пикселя отдельного двухмерного кадра видеопотока с цветовыми яркостями  $r_{xy}$ ,  $g_{xy}$ ,  $b_{xy}$ . Введем дискретные координаты:

$$\begin{aligned} x \leftrightarrow i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, I \text{ с шагом в } 1 \text{ пиксель;} \\ y \leftrightarrow j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, J \text{ с шагом в } 1 \text{ пиксель;} \\ \tau \leftrightarrow k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \text{ с шагом в } 1 \text{ кадр} \end{aligned} \quad (7)$$

Введение дискретных значений перечисленных величин приводит к следующим приближенным формулам для производных:

$$\frac{dr_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{r_{(k+1),i,j} - r_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (8)$$

$$\frac{dg_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{g_{(k+1),i,j} - g_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (9)$$

$$\frac{db_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{b_{(k+1),i,j} - b_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} D_{i,j,r} \left( \frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_{i,j,r} \left( \frac{\eta_{(i+1),j,k} - 2r_{i,j,k} + \eta_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \right. \\ \left. + \frac{r_{i,(j+1),k} - 2r_{i,j,k} + r_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{i,j,g} \left( \frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_{i,j,g} \left( \frac{g_{(i+1),j,k} - 2g_{i,j,k} + \eta_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \right. \\ \left. + \frac{g_{i,(j+1),k} - 2g_{i,j,k} + g_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_{i,j,b} \left( \frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_{i,j,b} \left( \frac{b_{(i+1),j,k} - 2b_{i,j,k} + b_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \right. \\ \left. + \frac{b_{i,(j+1),k} - 2b_{i,j,k} + b_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Примем, что  $\Delta_i = \Delta_j = \Delta_k = 1$  для всех пикселей всех цветовых составляющих. Тогда из (11), (12) и (13) получаем следующие коэффициенты.

$$\begin{aligned} D_{i,j,r} &= \frac{r_{i,j,(k+1)} - r_{i,j,k}}{\eta_{(i+1),j,k} + \eta_{(i-1),j,k} + r_{i,(j+1),k} + r_{i,(j-1),k} - 4r_{i,j,k}}. \\ D_{i,j,g} &= \frac{g_{i,j,(k+1)} - g_{i,j,k}}{g_{(i+1),j,k} + g_{(i-1),j,k} + g_{i,(j+1),k} + g_{i,(j-1),k} - 4g_{i,j,k}}. \\ D_{i,j,b} &= \frac{b_{i,j,(k+1)} - b_{i,j,k}}{b_{(i+1),j,k} + b_{(i-1),j,k} + b_{i,(j+1),k} + b_{i,(j-1),k} - 4b_{i,j,k}}. \end{aligned}$$

Коэффициентов  $D_{ij}$  в каждом из трех пар изображений столько, сколько в нем пикселей, т.е.  $I \times J$ . Пронормировав их от 0 до 255 с помощью выражений

$$r_{i,j}^p = \text{Int} \left( 256 \frac{|D_{i,j,r} - D_{\min r}|}{|D_{\max r} - D_{\min r}|} \right), \quad (14)$$

$$g_{i,j}^p = \text{Int} \left( 256 \frac{|D_{i,j,g} - D_{\min g}|}{|D_{\max g} - D_{\min g}|} \right), \quad (15)$$

$$b_{i,j}^p = \text{Int} \left( 256 \frac{|D_{i,j,b} - D_{\min b}|}{|D_{\max b} - D_{\min b}|} \right), \quad (16)$$

получим три сеточных поля дискретных яркостей  $r_{ij}^p$ ,  $g_{ij}^p$  и  $b_{ij}^p$  размерностью  $I \times J$  каждое или фактически три новых изображения, которые представляют собой итог параболического преобразования начального фрагмента цветного видеопотока. Верхний индекс  $p$  в выражениях (17) – (19) означает, что интенсивность относится уже не к пикселям исходного видеопотока, а к пикселям результата параболического преобразования (РПП).

Ранее доказано, что на границах подвижных участков изображения с постоянной на каждом участке, но разной между участками, яркостью, параболическое преобразование создает белую ( $z = 255$ ) линию толщиной в 1 пиксель на общем черном ( $z = 0$ ) фоне полученного кадра [3]. Наличие РПП предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно

использовать для расчетов в АСУ ТП.

Рассмотрим конкретный пример. Электропрогрев бетонных и железобетонных конструкций основан на превращении электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока через свежееуложенный бетон, который с помощью электродов включается в качестве сопротивления в электрическую цепь. Для электропрогрева применяют одно- или трехфазный переменный ток нормальной частоты (50 Гц), так как постоянный ток вызывает электролиз воды в бетоне. Электропрогрев бетона осуществляют при пониженных напряжениях (50 – 100 В).

Для прогрева малоармированных конструкций (с содержанием арматуры до 50 кг на 1 м<sup>3</sup>) в исключительных случаях применяют бестрансформаторный прогрев с напряжением электрического тока 120 – 220 В.

При нагреве электрическое сопротивление бетона возрастает, а для поддержания постоянной температуры необходимо сохранять постоянной силу тока. Для этого в процессе прогрева трансформаторами периодически повышают напряжение (ступенчатый прогрев).

Результатом измерений температурных полей являются выраженные числами данные о:

- абсолютных значений температуры в различных точках поверхности железобетонной детали;
- равномерности прогрева железобетонной детали;
- изменениях в абсолютных значениях температуры железобетонной детали;
- изменениях в равномерности прогрева железобетонной детали.

Пусть система управления каждый раз должна принимать решения, являются ли эти флуктуации температурных полей нормой или же они свидетельствуют о нежелательных изменениях в процессе твердения бетона, требующие дополнительного вмешательства системы.

Для ответа на этот вопрос использовали числовые значения косвенных характеристик РПП, например, его мощности и дисперсии.

Технология измерения термического состояния железобетонной детали имеет две фазы деятельности: обучение и работа. При этом подвижное цветное изображение от тепловизора рассматривается как отдельный зрительный образ объекта наблюдения, который может находиться в двух состояниях: несущественные и существенные изменения тепловых полей, требующие вмешательства АСУ ТП.

Для определения существенности в каждом конкретном случае используется квадратичная метрика.

Численная информация о несущественных изменениях хранится в базе данных системы автоматизированной оценки состояния процесса твердения железобетона.

Перечисленные компоненты метрического критерия являются минимальным “набором” ин-

формации, которую можно получить в результате цифровой обработки РПП цветного видеопотока от тепловизора. Этот набор может быть значительно расширен, например, за счет автономного анализа отдельных фрагментов РПП, придания этим фрагментам различных весовых характеристик значимости и т.п.

## VI. ВЫВОДЫ

Предложено для оценки теплового состояния затвердевающего железобетона использовать видеосъемку внешней поверхности соответствующей детали с помощью тепловизора с последующим параболическим преобразованием полученного при этом полноцветного видеопотока.

Испытание подсистемы принятия решений, основанной на таком преобразовании и интеллектуальной обработке получаемой при этом информации, подтвердило технико-экономические преимущества метода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Арбеньев А.С.** Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроразогревом смеси // *Промышленный вестник*, 1998. – № 6 – 7. – 8 с.
2. **Вавилов В.П.** Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
3. **Становский П.А.** Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора / **П.А. Становский, Л.В. Бовнегра, Ю.В. Шихирева** // *Труды Одесского политехнического университета*, 2012. – Вып. 2(39). – С. 67 – 71.

Получена в редакции 14.02.2013, принята к печати 20.02.2013