

УДК 004.045:004.932

Г.А. ОБОРСКИЙ, д-р техн. наук,
В.М. РЯЗАНЦЕВ, канд. экон. наук,
Ю.В. ШИХИРЕВА, Одесса, Украина

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ИНФРАКРАСНЫМ ВИДЕОПОТОКАМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Внутрішні високодинамічні теплові процеси, які супроводжують виготовлення та експлуатацію будівельних та машинобудівельних деталей не піддаються безпосередньому неруйнівному контролю. Тому для оцінки стану таких деталей під час виготовлення або експлуатації запропоновано використовувати інфрачервону відеозйомку зовнішньої поверхні деталі з наступним параболічним перетворенням отриманого при цьому відеопотоку. Вперше запропонований метод параболічного перетворення кольорових відеопотоків.

Внутренние высокодинамические тепловые процессы, сопровождающие изготовление и эксплуатацию строительных и машиностроительных деталей, не поддаются непосредственному неразрушающему контролю. Поэтому для оценки состояния таких деталей во время изготовления и эксплуатации предложено использовать инфракрасную видеосъемку внешней поверхности деталей с последующим параболическим преобразованием полученного при этом видеопотока. Впервые предложен метод параболического преобразования цветного видеопотока.

The internal high-dynamic thermal processes accompanying production and operation of construction and machine-building details, don't give in to direct nondestructive control. Therefore for an assessment of a such details condition during production and operation it is offered to use infrared video filming of an details external surface with the subsequent parabolic transformation of the received thus video stream. For the first time the method of parabolic transformation of a color video stream is offered.

Введение. После укладки и уплотнения бетонной смеси на современных предприятиях строительной индустрии осуществляется уход за созревающим 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, желательна, 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.

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 тепла, 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.

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 изготовляют 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.

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.

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.

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

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

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

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 xu -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 τ интерпретируются теперь как дискретные пространственно-временные координаты некоторого xu -го пикселя отдельного двумерного кадра видеопотока с цветовыми яркостями r_{xy} , g_{xy} , b_{xy} . Введем дискретные координаты:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$D_{i,j,r} = \frac{r_{i,j,(k+1)} - r_{i,j,k}}{r_{(i+1),j,k} + r_{(i-1),j,k} + r_{i,(j+1),k} + r_{i,(j-1),k} - 4r_{i,j,k}}. \tag{14}$$

$$D_{i,j,g} = \frac{g_{i,j,(k+1)} - g_{i,j,k}}{g_{(i+1),j,k} + g_{(i-1),j,k} + g_{i,(j+1),k} + g_{i,(j-1),k} - 4g_{i,j,k}}. \tag{15}$$

$$D_{i,j,b} = \frac{b_{i,j,(k+1)} - b_{i,j,k}}{b_{(i+1),j,k} + b_{(i-1),j,k} + b_{i,(j+1),k} + b_{i,(j-1),k} - 4b_{i,j,k}}. \tag{16}$$

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

$$r_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,r} - D_{\min r}|}{|D_{\max r} - D_{\min r}|} \right), \tag{17}$$

$$g_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,g} - D_{\min g}|}{|D_{\max g} - D_{\min g}|} \right), \tag{18}$$

$$b_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,b} - D_{\min b}|}{|D_{\max b} - D_{\min b}|} \right), \tag{19}$$

получим три сеточных поля дискретных яркостей $r_{i,j}^p$, $g_{i,j}^p$ и $b_{i,j}^p$ 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 м³) 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.

Перечисленные компоненты метрического критерия являются минимальным “набором” информации, 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.

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.

Список использованных источников: 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.