

УДК 004.942:004.932.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40003

# МЕТОД ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

**А. Л. Становский**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: stanovsky@mail.ru

**Л. В. Бовнегра**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра информационных технологий  
проектирования в машиностроении\*\*

E-mail: dlv5@ukr.net

**Ю. В. Шихирева**

Кандидат технических наук\*

E-mail: uliabovnegra@mail.ru

**А. В. Шмараев**

Кафедра металлорежущих станков,  
метрологии и сертификации\*\*

E-mail: schmaraev@gmail.com

\*Кафедра нефтегазового и химического машиностроения\*\*

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

Для метрологічного забезпечення проектування та управління, яке містить обробку проміжних результатів вимірювання у вигляді зображень, не підходять існуючі методи стиснення останніх. Це пояснюється необхідністю замінювати зворотні задачі оптимізації на множині прямих і різким збільшенням складності. Створено метод віртуальної моделі. Експериментально підтверджено позитивний технічний ефект при використанні запропонованого методу в будівництві

**Ключові слова:** метрологічне забезпечення САПР та АСУ, обробка зображень, метод віртуальної моделі

Для метрологического обеспечения проектирования и управления, содержащего обработку промежуточных результатов измерения в виде изображений, не подходят существующие методы сжатия последних. Это объясняется необходимостью заменять обратные задачи оптимизации на множество прямых и резким увеличением временной сложности. Создан метод виртуальной модели. Экспериментально подтвержден позитивный технический эффект при использовании предложенного метода в строительстве

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение САПР и АСУ, обработка изображений, метод виртуальной модели

## 1. Введение

В современной метрологии распространены схемы, в которых между измерительным датчиком и результатом измерения полученная от датчика информация подвергается серьезному компьютерному преобразованию. Особенно популярна эта схема в том случае, когда датчиком является прибор, на выходе которого получается изображение: фото и киноаппарат, рентгеновская установка, магнитно-ядерный томограф, тепловизор и т. д. Очевидно, что информация, содержащаяся в таких изображениях, слишком велика для восприятия ее в качестве результата измерения и, тем более, для использования этого «результата» в задачах (АСУ, САПР и т. д.), для которых, собственно, и производится измерение.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Поскольку в работе речь идет об обработке изображений как элементе метрологического обеспече-

ния САПР и АСУ, к такой обработке предъявляются специфические требования, ограничивающие его существенно метрологические характеристики: мало-размерность выхода, точность, чувствительность, диапазон измерений и пр.

В то же время, во многих случаях существующие методы компьютерной обработки изображений используются с целью идентификации его содержательной части [1, 2]. Решение подобных задач позволяет лишь так или иначе преобразовать изображение, не уменьшая при этом сколько-нибудь значительно объем содержащейся в нем информации [3]. В итоге такие преобразования не решают главную задачу метрологии: получить на выходе некоторое число, которое можно было бы интерпретировать в качестве результата, собственно, измерения [4, 5].

Отсутствие методов преобразования цифрового изображения в число, наиболее информативное с точки зрения содержащихся в изображении данных, интересующих непосредственно метрологов, а также тех специалистов, которые используют результатами измерений, является основной проблемой при решении задач разработки и имплементации в САПР и АСУ

метрологического обеспечения, построенного по схеме «объект – прибор (датчик) – компьютер – пользователь».

Важнейшей частью указанной схемы метрологического обеспечения является метод компьютерного сжатия изображений, полученных от датчика (например, фотографий объекта). Существует множество методов такого сжатия, однако все они созданы для решения задач хранения, передачи, воспроизведения и распознавания информации, содержащейся в изображении. Если же рассматривать эти методы с точки зрения применения их в проектировании и управлении, то проблемы возникают, как из-за особенностей объекта измерения, так из-за характеристик самих методов.

В частности, к недостаткам многих объектов измерения с точки зрения обработки изображений можно отнести их несимметричность [6], нерегулярность (отсутствие повторяющихся элементов) [7], большой диапазон значений параметров [8] и большая скорость изменения значений параметров [9], что увеличивает и без того большую временную сложность обработки.

К недостаткам этих методов с точки зрения требований метрологии [10–12], безусловно, можно отнести то, что на их выходе формируется не число, а достаточно большой массив информации, который нельзя трактовать как «результат измерения» [13, 14]. Их низкая чувствительность (нет строгой информационной связи между входом и выходом) [15, 16], низкая точность [17, 18], а также недостаточная скорость или, что то же самое, продолжительное время обработки информации, не позволяет использовать эти методы, например, в проектировании или *on-line* управлении [19, 20].

В то же время, в механике существует метод виртуального объекта [21], позволяющий сгладить многие недостатки, как объекта, так и способа измерений, но, к сожалению, не применяющийся в метрологии.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является совершенствование метода виртуального объекта для возможности его использования при разработке и имплементации метрологического обеспечения, основанного на обработке большого массива промежуточной информации в виде изображений и/или видеопотоков.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать теоретические основы метода виртуальной модели;
- разработать предпосылки имплементации предложенного метода измерений в рамках САПР технологии формирования железобетонных изделий при отрицательных температурах окружающего воздуха;
- разработать предпосылки имплементации предложенного метода измерений в рамках АСУ процессом затвердевания железобетонных изделий при отрицательных температурах окружающего воздуха.

## 4. Виртуальные объекты и модели в метрологии

### 4. 1. Теоретические основы метода виртуальной модели

Пусть объект управления  $\Omega$  обладает следующими атрибутами:

$\mathbf{x}$  – вектор размерных параметров (конфигурация);  
 $\lambda$  – вектор характеристик материалов, из которых состоит объект;

$\mathbf{q}$  – вектор внешних воздействий на объект.

Если рассматривать комплекс этих множеств  $\{\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{q}\}$  в качестве *параметров-причин*, то *параметрами-следствиями* могут считаться некоторый вектор чисел  $\mathbf{r}$ , соответствующий в некотором смысле исходному объекту  $\Omega$ .

Пусть объект  $\Omega$  можно измерить, т.е. получить вектор  $\mathbf{r}$  в виде результата измерения, применяя для этого измерительную схему «объект – прибор (датчик) – компьютер – пользователь» и соответствующее этой схеме информационное преобразование «параметры объекта  $\Omega$  – пространственное отображение  $\text{ПО}(\Omega)$  – результат измерения  $\mathbf{r}$ » (рис. 1).

Сложность и точность получения результата измерения  $\mathbf{r}$  определяется конкретными характеристиками объекта, а также принятыми датчиками первичного измерения и компьютерным методом обработки его результатов, то есть совокупным метрологическим обеспечением.

Итак, задача *измерения* сводится к нахождению:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{q}). \quad (1)$$

Такое измерение решает прямую задачу: измерить объект  $\Omega\{\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{q}\}$  и получить результат измерения  $\mathbf{r}$ , причем этот результат всегда существует и он единственный.

Далее все определяется целью измерения объекта. Если она состоит в использовании результата измерения  $\mathbf{r}$  в цепи отрицательной обратной связи (рис. 1), то одного измерения (1) мало, – надо, как минимум, дополнительно решить задачу вычисления изменений, вносимых в управление по результатам этого измерения, т.е. решить задачу, обратную задаче (1).



Рис. 1. Схема управления объектом по результату измерения в виде компьютерной свертки пространственного отображения

Поскольку нами определены три исходных множества  $\{x, \lambda, q\}$ , необходимые для решения прямой задачи (1), существуют, как минимум, три обратные задачи.

1. По известному результату измерения  $g$ , характеристикам  $\lambda$  и воздействиям  $q$  рассчитать конфигурацию  $x$ :

$$x = x(g, \lambda, q). \tag{2}$$

По известному результату измерения  $g$ , конфигурации  $x$  и воздействиям  $q$  рассчитать характеристики  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda(x, g, q). \tag{3}$$

2. По известному результату измерения  $g$ , характеристикам  $\lambda$  и конфигурации  $x$  рассчитать воздействия  $q$ :

$$q = q(x, \lambda, g). \tag{4}$$

В проектировании решаются первая и вторая обратные задачи (2) и (3), в управлении – третья (4).

К сожалению, обратные задачи (2)–(4) относятся к классу некорректно поставленных. Для результатов измерений в виде обработок изображений их практически невозможно решать аналитическими методами, т. к. существенным недостатком таких результатов является то, что операторы  $x, \lambda$  и  $q$ , обратные оператору  $g$ , во многих случаях не являются непрерывными. Например, требования корректности для обратной задачи (4) сводятся к следующей формулировке. Необходимо найти решения по начальным данным  $g_{ид}$ ,  $q = G(g)$ , где  $G$  – некоторый оператор. Если  $g$  и  $q$  принадлежат множествам  $R$  и  $Q$ , для элементов которых определено понятие расстояния (метрики)  $g_q(q_1, q_2)$  и  $g_R(r_1, r_2)$ , где  $q_1, q_2 \in Q, r_1, r_2 \in R$ , то есть  $Q$  и  $R$  – метрические пространства, то должны удовлетворяться следующие три требования:

- существования: для всякого  $r \in R$  существует решение  $q$  из  $Q$ ;
- однозначности: решение определяется однозначно;
- стойкости: решение должно непрерывно зависеть от входных данных, то есть, для всякого  $\epsilon > 0$  можно указать такое  $\delta(\epsilon)$ , что если  $g_R(r_1, r_2) \leq \delta$  и  $q_1 = G(r_1), q_2 = G(r_2)$ , то  $g_q(q_1, q_2) \leq \epsilon$ .

В этих условиях даже приближенные решения (2)–(4) могут не существовать, то есть может не выполняться первое требование корректности по Адамару. Больше того, даже если решения (2)–(4) существуют, они не будут иметь свойство устойчивости, если операторы  $x, \lambda$  и  $q$  не являются непрерывными.

Решение этих задач неаналитическими методами, например, методом перебора предполагает замену одной обратной задачи (2), (3) или (4) некоторым множеством прямых (1). При этом решающий алгоритм резко усложняется, столь же резко возрастает его временная сложность. В частности, для управления с помощью изменения внешнего воздействия  $\Delta q$  на объект  $\Omega$  решающий алгоритм подбора выглядит следующим образом:

- 1) выбрать некоторое начальное решение  $\Delta q = \Delta q_{нач}$ ;
- 2) решая прямую задачу (1), рассчитать  $g_{нач}(\Delta q_{нач})$ ;
- 3) определить допустимость отклонения  $g_{нач}$  от области допустимых значений  $g$ ;

4) если отклонение допустимо, остановиться, если нет, – вернуться к п. 1), изменить  $\Delta q_{нач}$  и повторять пп. 2) – 4) до останова.

Область допустимых значений  $g$  определяет пользователь, исходя из условий задачи.

Таким образом, решение методом перебора предполагает некоторое «движение» в области определения возможных внешних воздействий на объект  $q \in Q$ . В подавляющем большинстве случаев управления такое «движение» невозможно или нецелесообразно реализовывать непосредственно на объекте. Для этого в АСУ создается модель последнего, но не обычная в виде пространственного отображения ПО, а виртуальная. Виртуальная в том смысле, что в ней, в отличие от полученного непосредственным измерением ПО, допускаются различные, невозможные в реальном мире состояния отдельных элементов (рис. 2, а–в).

Возможность и целесообразность такого допущения подтверждаются опытом использования виртуальных объектов в механике [22]; их примеры приведены на рис. 3, а–в.

Виртуальный объект допускает (по определению) движение подбора решений в любом направлении (вдоль любого параметра), независимо от его целесообразности и даже возможности.

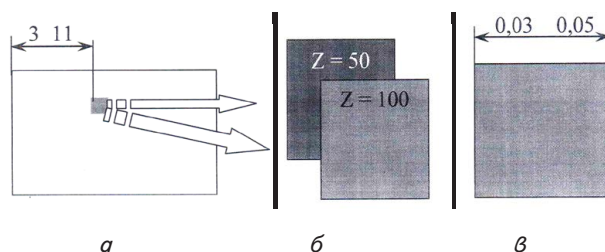


Рис. 2. Варианты виртуальных элементов в модели пространственного отображения, полученного в результате измерения: а – пиксель изображения имеет одновременно различные координаты; б – пиксель изображения имеет одновременно различную яркость; в – пиксель изображения имеет одновременно различные размеры

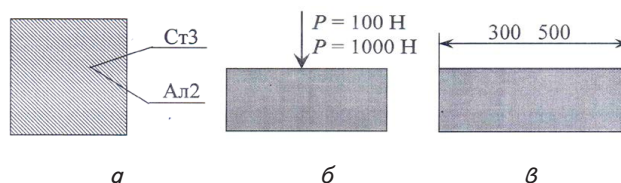


Рис. 3. Варианты виртуальных объектов в механике: а – элемент одновременно выполнен из стали и алюминия; б – на элемент одновременно в одной точке действуют различные по величине силы; в – тело одновременно имеет различные значения некоторого размера

Пусть для поиска оптимального управления некоторым объектом необходимо «двигаться» вдоль параметра  $P1$  его модели, но решающий алгоритм такое движение ограничивает, например, высокой временной сложностью компьютерных вычислений (запрет А). Пусть движением вдоль параметра  $P2$  модели также

можно оптимизировать управление объектом (назовем этот процесс квазиоптимизацией), но такое движение запрещает физическая или иная основа модели (запрет Б).

В случае «обычной» модели в этих условиях придется двигаться, изменяя P1, – ведь противоречащий здравому смыслу запрет Б непреодолим! Иное дело – если модель виртуальна, – в ней нет никаких запретов! Тогда, двигаясь в направлении P2 внутри виртуальной модели, найдем вначале квазиоптимальное (виртуальное) управляющее воздействие  $\Delta q_{\text{кво}}$ .

Далее предстоит переход от квазиоптимального воздействия  $\Delta q_{\text{кво}}$  к оптимальному  $\Delta q_{\text{опт}}$ . Задача решена и запрет А обойден. Результат – значительное снижение временной сложности поиска оптимального управляющего воздействия. Таким образом, предлагаемый метод состоит из двух этапов: квазиоптимизации и финишного перехода.

Как указывалось выше, разнообразие подходов позволяет использовать метод виртуальной модели как на этапе проектирования, так и на этапе управления объектом.

В практике проектирования чаще всего приходится решать первую обратную задачу (2), то есть оптимизировать конфигурацию объекта измерения, так как свойства их материала и внешние воздействия намного меньше зависят от воли проектировщика. Прямая задача (1) используется, в основном, при анализе вариантов проекта. При проектировании сложных объектов результат расчета не всегда очевиден, и оптимальное решение получается только после генерирования и отвергания нескольких вариантов.

Начальные и конечные состояния математических моделей объектов для всех видов преобразований одинаковы, – они отличаются только промежуточным (виртуальным) состоянием модели, выбор типа которой принадлежит пользователю.

Процесс управления возможен только при изменяющихся во времени значениях управляющего воздействия  $\Delta q(\tau)$  и текущего значения результата измерения  $r(\tau)$ . Кроме того, управление объектом предполагает его уже существующими, а значит векторы параметров  $x$  и  $\lambda$  неизменными, а связанные с этим измерения и расчеты сводятся к обратной процедуре (4) [22].

Рассмотрим конкретные примеры применения предложенного метода виртуальной модели в строительстве. Речь идет о проектировании и управлении таким важнейшим технологическим процессом, как затвердевание железобетонных деталей здания на морозе, когда внутренний электрический подогрев обеспечивает необходимую для набора прочности температуру бетона. Здесь метрологическое обеспечение

играет важнейшую роль, а основным промежуточным результатом измерения является термограмма поверхности бетона, по которой необходимо принимать решения о том или ином воздействии на объект измерения.

#### 4. 2. Использование предложенного метода измерений в рамках САПР

На этапе автоматизированного проектирования объекта еще нет, и измерение термических процессов в затвердевающих на морозе бетонных конструкциях может быть практически осуществлено только на лабораторных образцах.

Однако реальная польза от такого измерения на этом этапе жизненного цикла железобетона весьма высока. Действительно, любые, «самые точные» оптимизационные расчеты на самом деле будут весьма далеки от реальности, по крайней мере, по следующим причинам:

- железобетон – материал существенно гетерогенный, поэтому употребление при расчетах любых выбранных значений эффективных коэффициентов теплопереноса (теплопроводность, теплоемкость, теплоотдача и пр.) будет неоправданным из-за очень низкой точности такого выбора;

- компоненты железобетона (гравий, песок, цемент, вода, сталь) существенно отличаются по перечисленным выше показателям, а их распределение по объему изделия, от которого зависит эффективные значения, труднопредсказуемо;

- в процессе твердения, сопровождающегося химическими реакциями и изменением агрегатного состояния компонент, основные термодинамические условия в изделии (температура, давление, концентрация) существенно изменяются и т. д.

Все это приводит к необходимости лабораторного тестирования принимаемых проектных решений. Несовпадения, рассчитываемые по этим формулам, могут быть использованы для корректировок значений коэффициентов, принимаемых при расчетах. Схема «работы» предложенного метода в рамках системы автоматизированного проектирования процесса затвердевания бетонной конструкции на морозе приведена на рис. 4.

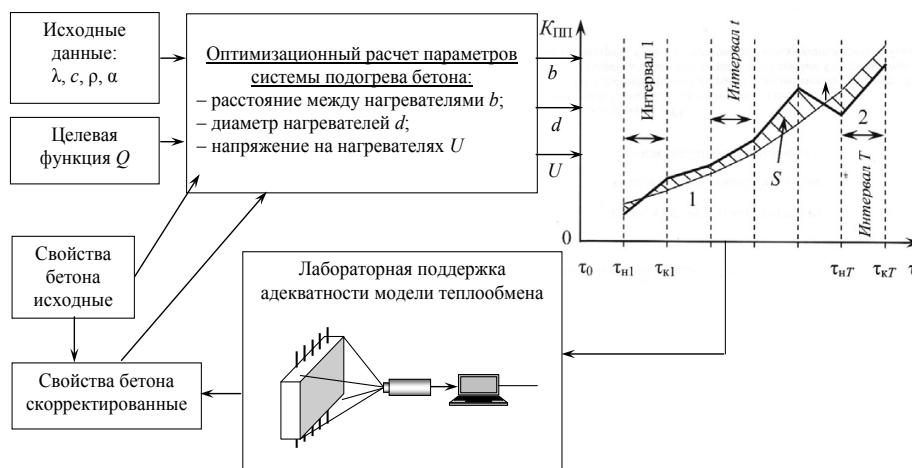


Рис. 4. Схема «работы» предложенного метода в рамках системы автоматизированного проектирования процесса затвердевания бетонной конструкции на морозе

На рис. 4 обозначены:  $\lambda$  – эффективный коэффициент теплопроводности бетона;  $c$  – эффективный коэффициент теплоемкости бетона;  $\rho$  – эффективная плотность материала бетона; эффективный коэффициент теплопроводности бетона;  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи от поверхности бетона;  $Q$  – среднее теплосодержание изделия из бетона.

Расчет параметров системы подогрева бетона позволяет спроектировать такие расстояния между нагревателями  $b$ ; диаметр нагревателей  $d$  и напряжение на нагревателях  $U$ , которые в последующем обеспечат заданное отклонение  $S$  проектной кривой нагрева 1 от фактической 2 (см. график нагрева на рис. 4).

### 4. 3. Использование предложенного метода измерений в рамках АСУ

В рамках АСУ система измерения интегральных параметров тепловых процессов при затвердевании на морозе железобетона за счет обработки инфракрасных потоков от поверхности изделий встраивается отдельным звеном в общую систему автоматизированного управления.

Переменные значения температуры, по которым ведется расчет управляющего воздействия, в частности, минимальное значение температуры во всех точках железобетонного изделия, или средняя температура этого изделия при нагреве электрическим током, к сожалению, не может быть измерено непосредственно.

Поэтому управление ведется по измеряемому дифференциальному критерию термического состояния  $K_{ППдиф}$ , который учитывает отдельно результаты параболического преобразования по пяти каналам измерения.

Измеряя постоянно значение  $K_{ППдиф}$  от некоторого участка железобетонной плиты с управляемым нагревом, метрологическое обеспечение помогает АСУ реагировать на отклонения от заданного режима нагрева, падение минимальной температуры объекта, вызванными, например, суточным изменением температуры окружающей среды или другими метеорологическими отклонениями в зоне строительства.

Обеспечивая отрицательную обратную связь с входными настройками объекта управления (например, с напряжением на нагревателях  $U$ ), система восстанавливает контролируемые значения, в первую очередь, минимальную по объему температуру в плите, и, во вторую, – обеспечивает минимизацию затрат электроэнергии на подогрев.

Схема «работы» предложенного метода в рамках автоматизированной системы управления затвердеванием бетонной конструкции на морозе приведена на рис. 5.

Как видно из рисунка, кроме обычной схемы замкнутого управления с отрицательной обратной связью, АСУ затвердеванием бетонной конструкции на морозе дополнительно содержит блок лабораторной

поддержки адекватности модели теплообмена, что значительно повышает для этого объекта эффективность принимаемых управленческих решений.

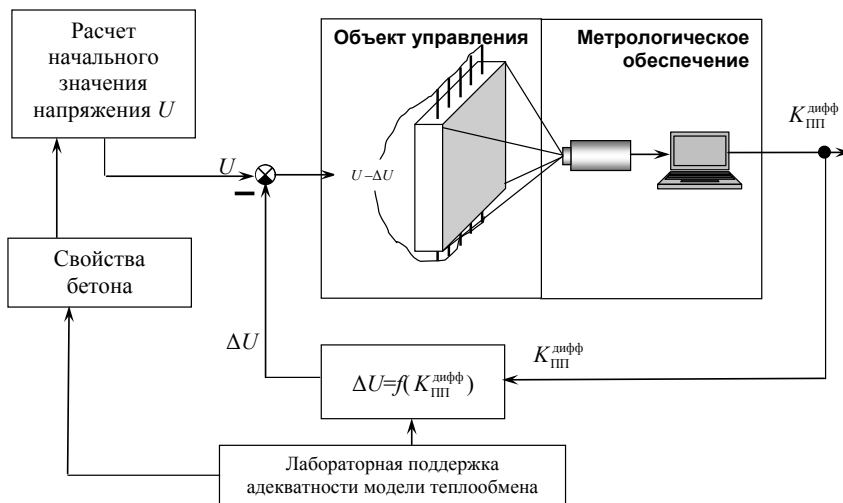


Рис. 5. Схема «работы» предложенного метода в рамках автоматизированной системы управления затвердеванием бетонной конструкции на морозе

В частности, испытания такой схемы управления были проведены на строительной площадке ООО «Стикон» (г. Одесса). В результате испытаний зафиксировано повышение прочности строительных изделий из железобетона (колонн, диафрагм, плит перекрытий) на 16–19 %.

## 5. Выводы

Усовершенствован метод виртуального объекта, благодаря чему создана возможность его использования при разработке и имплементации метрологического обеспечения, основанного на обработке большого массива промежуточной информации в виде изображений и/или видеопотоков.

Разработаны научные основы метода обработки пространственно-временных отображений от объекта измерения, включающие определение виртуальной модели, способы ее построения и принципы использования в метрологическом обеспечении автоматизированного проектирования и управления.

Конкретные примеры применения предложенного метода виртуальной модели рассмотрены на примере САПР и АСУ затвердеванием железобетонных изделий на морозе, когда внутренний электрический подогрев обеспечивает необходимую для набора прочности температуру бетона.

Предложенный метод испытан в среде общей метрологической системы «INMER» (*infrared measurements*), предназначенной для измерения и контроля параметров тепловых процессов при твердении на морозе железобетона за счет обработки инфракрасных потоков от поверхности таких изделий. В рамках АСУ технологическим процессом строительства зданий система «INMER» встраивалась отдельным звеном в общую систему автоматизированного управления, а именно, в цепь обратной связи АСУ.

В частности, испытания системы «INMER» были проведены на строительной площадке ООО «Стикон»

(г. Одесса). В результате испытаний зафиксировано повышение прочности строительных изделий из железобетона (колонн, диафрагм, плит перекрытий) на 16–19 %.

#### Литература

1. Saupé, D. Fractal image compression: An introductory overview [Text] / D. Saupé, R. Hamzaoui, H. Hartenstein. – Institute for Informatics, Freiburg University, Germany, 1996. – P. 1–66.
2. Avcibas, I. Image Quality Statistics and their use in steganalysis and compression [Text]: PhD Thesis / I. Avcibas. – Bogazichi Univ., 2001. – 113 p.
3. Datta, R. Content-based image retrieval – approaches and trends of the new age [Text] / R. Datta, J. Li, J. Z. Wang // Proceedings of the 7th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval - MIR '05, 2005. – P. 253–262. doi: 10.1145/1101826.1101866
4. Сергеев, А. Г. Метрология [Текст] / А. Г. Сергеев. – М.: Логос, 2005. – 272 с.
5. Боголюбов, Н. В. Лекции по метрологии [Текст] / Н. В. Боголюбов. – М.: Логос, 2005. – 272 с.
6. Становский, П. А. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора [Текст] / П. А. Становский, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева // Праці Одеського політехнічного університету. – 2012. – Вип. 2 (39). – С. 67–71.
7. Шихирева, Ю. В. Особенности проектирования и управления процессами нагрева твердеющего железобетона внутренними источниками тепла [Текст] / Ю. В. Шихирева, Г. А. Оборский, О. С. Савельева // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – 2014. – Т. 2, № 5 (68). – С. 20–24. doi: 10.15587/1729-4061.2014.23349
8. Long, F. Fundamentals of content-based image retrieval [Text] / F. Long, H. Zhang, D. Feng; D. Feng, W. Sie (Eds.) // Multimedia Information Retrieval and Management – Technological Fundamentals and Applications, 2003. – P. 1–32.
9. Shi, R. An adaptive image content representation and segmentation approach to automatic image annotation [Text] / R. Shi, H. Feng, T.-S. Chua, C.-H. Lee // Lecture Notes in Computer Science, 2004. – P. 545–554.
10. Красных, А. А. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / А. А. Красных, С. Н. Епифанов. – Киро: DznUE, 2001. – 340 с.
11. Гугнін, В. П. Основи метрології та вимірювальної техніки [Текст] / В. П. Гугнін, Г. О. Оборський. – Одеса: Астропринт, 2003. – 200 с.
12. Величко, О. М. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості. Том 1: Метрологія [Текст] / О. М. Величко, Л. В. Коломієць, Т. Б. Гордієнко. – Одеса: ВМВ, 2014. – 688 с.
13. Становский, П. А. Кодирование и поиск подвижных и неподвижных изображений в хранилищах данных [Текст] / П. А. Становский // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск «Комп'ютерні системи та мережі». – 2009. – Вип. 72. – С. 231–234.
14. Winkler, S. Digital Video Quality. Vision models and metrics [Text] / S. Winkler. – Wiley, 2005. – 192 p.
15. Розенфельд, А. Распознавание и обработка изображений [Текст] / А. Розенфельд. – М.: Мир, 1987. – 274 с.
16. Jain, R. Visual Information Retrieval [Text] / R. Jain, A. Gupta // Communications of the ACM. – 1997. – Vol. 40, Issue 5. – P. 72–77. doi: 10.1145/253769.253798
17. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений [Текст] / У. Прэтт; Кн. 1, 2. – М.: Наука, 2000. – 1024 с.
18. Wang, Z. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity [Text] / Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, Issue 4. – P. 937–942. doi: 10.1109/tip.2003.819861
19. Становский, П. А. Сегрегация изображений с помощью параболических моделей [Текст]: матер. XVII семинара / П. А. Становский // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОНПУ, 2009. – С. 78–79.
20. Kominek, J. Algorithm for fast fractal image compression [Text] / J. Kominek // Proceedings from IS&T/SPIE 1995 Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology, 1995. – Vol. 2419. Digital Video Compression: Algorithms and Technologies. – P. 296 – 305.
21. Гончарова, О. Е. Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций [Текст] / О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов, А. Л. Становский // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 41–44.
22. Балан, С. А. Применение метода виртуального объекта в машиностроении [Текст]: тр. VII семинара / С. А. Балан, Т. П. Становская, О. Е. Гончарова // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОГПУ, 2000. – С. 12–16.