

2. ГОСТ 8.207-76.Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

3.Патент 2426110 С1 RU. Калиниченко Н.П., Калиниченко А.Н., Конарева И.С. Способ изготовления контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии. Заявлено 20.04.2010; опубликовано 10.08.2011 Бюл. №22.

4. РД-13-06-2006. Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Введены в действие с 25 декабря 2006 г.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ**

*Рабданов Ч.А.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Нестерук Д.А., к. т.н., доцент кафедры  
физических методов и приборов контроля качества*

Рассмотрены принципы и особенности применения статистического метода анализа главных компонент (МАГК) в активном тепловом контроле. Выполнено сравнение МАГК с Фурье-анализом при контроле дефектов в композиционных материалах, коррозии в алюминии и влаги в строительных материалах. Сделан вывод о том, что изображения главных компонент, как правило, обеспечивают повышение отношения сигнал/шум и по эффективности близки к фазограммам, тем не менее, результаты применения данного метода труднопредсказуемы и требуют дальнейшего анализа.

### **Введение**

Метод анализа главных компонент (МАГК) нашел применение в статистике при обработке многомерных данных, в криминалистике при распознавании лиц, сжатии изображений и т.п. Метод применяется и в инфракрасной (ИК) термографии, например, для разделения оптических и тепловых эффектов. В частности, таким способом устраняют ложные дефекты при термографировании неоднородных поверхностей. Имеются сведения об использовании МАГК при обнаружении скрытой коррозии методом теплового контроля (ТК); при этом установлена связь толщины материала с определенными главными компонентами.

Результатом активного теплового контроля являются трехмерные матрицы данных, представляющие собой последовательности ИК изображений. С использованием МАГК такие последовательности сводят к последовательности изображений главных компонент, причем первые 3-5 изображений содержат наиболее значимую информацию о статистических особенностях температурных сигналов.

### Определение

РСА (Principal Component Analysis) – данный метод применяется при обработке многомерных данных. В качестве таких данных может служить, например, информация по сотруднику (уровень з.п., возраст, рост и т.д.). В этом случае число данных (или количество точек в многомерном пространстве) определяется количеством опрашиваемых сотрудников, а размерность данных определяется количеством пунктов, по которым опрашиваются сотрудники. Например:

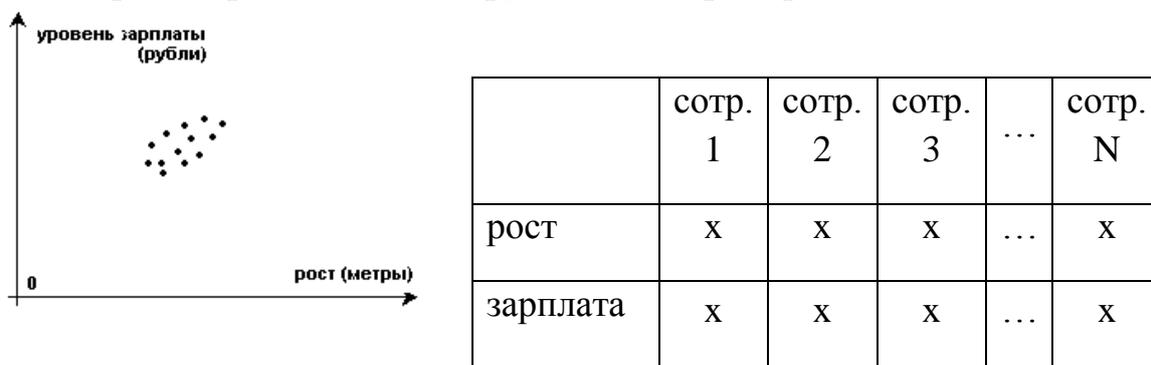


Рис. 1. Представление многомерных данных (графически и таблично)

В общем случае мы можем иметь размерность данных  $M$  и количество измерений  $N$ .

Т.к. обычно некоторые измерения связаны друг с другом (т.е. имеется избыточность в данных), то имеется возможность уменьшить размерность данных (число  $M$ ), вводя  $K < M$  новых осей, на которые проецируются исходные данные.

Принцип вычисления главных компонент состоит в том, что для исходной матрицы  $X$  определяют ковариационную (рассеивающую) матрицу в виде  $C = 1/(N-1) * (X-M) * (X-M)^T$ , где  $M$  – матрица состоящая из размноженного  $N$  раз вектора-столбца средних значений по каждой переменной  $x_i$ . Элементы ковариационной матрицы, лежащие на диагонали, отражают дисперсию (variance, вариацию)  $i$ -й переменной, а элементы лежащие вне главной диагонали отражают

взаимную ковариацию (covariance) между переменными  $i$  и  $j$ . Ковариационная матрица является квадратной (размерностью  $M * M$ ) и симметричной относительно главной диагонали.

Для вычисления дисперсии используется стандартная формула:

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2, \quad (1)$$

а ковариацию переменных  $x_1$  и  $x_2$  находят по выражению:

$$cv = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{1i} - m_1) * (x_{2i} - m_2), \quad (2)$$

где  $m$ - среднее значение для переменной.

Малые значения дисперсии переменной говорят о возможном шумоподобном сигнале, который отражает соответствующая переменная; соответственно, большие значения ковариации (по модулю) говорят о связи переменных (положительной или отрицательной). Нулевая корреляция означает, что переменные не зависят друг от друга. В качестве рассеивающей может применяться также и корреляционная матрица.

МАГК основан на введении такого линейного преобразования  $Y = P^T X$  данных  $P$ , что ковариационная матрица для нового набора данных  $Y$  является диагональной, то есть корреляция между различными строчками (переменными) матрицы  $Y$  равна нулю (все элементы матрицы кроме диагональных равны нулю). Данное условие выполняется, если столбцы матрицы  $P$  являются собственными векторами ковариационной матрицы  $C$  для  $X$ , при этом каждый столбец в матрице  $P$  называется главной компонентой.

Обычно главные компоненты в матрице  $P$  располагают в порядке убывания собственных значений  $D$  ковариационной матрицы  $C$ . В результате получают новый набор переменных  $Y$ , не связанных друг с другом. Величина собственного значения  $D_i$  для матрицы  $C$  отражает дисперсию для соответствующей переменной  $Y_i$  матрицы  $Y$ . Общая дисперсия для набора переменных  $Y$  определяется как сумма дисперсий  $D_i$  для каждой переменной  $Y_i$ .

Важным свойством переменных для матрицы  $Y$  (при расстановке главных компонент в порядке убывания собственных значений  $D_i$ ) является то, что с первой переменной связано максимальное значение дисперсии, поэтому эта переменная коррелирует с максимально возможным количеством переменных из исходного набора переменных

$X$ ; значение дисперсии для второй переменной меньше, чем для первой переменной, и она коррелирует с максимально возможным количеством переменных из набора  $X$ , которые имеют слабую корреляцию с первой переменной из набора  $Y$ . Взаимная корреляция первой и второй переменных из набора  $Y$  равна нулю. Аналогично можно продолжить это рассуждение и для следующих переменных из набора  $Y$ .

Для интерпретации смысла полученных компонент и набора переменных  $Y_i$  используют технику вращения (factor rotation, или factor loadings). В МАГК смысловую нагрузку главной компоненты определяют по величине взаимной корреляции между переменными  $Y_i$  и переменными  $X_i$ .

Для выбора количества наиболее значимых главных компонент можно применять правило 80/20 (правило Парето), т.е. оставлять только первые 20% компонент от общего количества. Иными словами, согласно этому правилу 20% процентов переменных обеспечивают 80% общей вариации данных.

## 1. Применение МАГК в ТК

Основная задача факторизации матриц сводится к представлению данной матрицы в виде произведения двух других матриц. Применительно к ТК это требует преобразования трехмерной матрицы (последовательности) ИК изображений в двухмерную, причем колонки двухмерной матрицы отражают развитие температуры во времени, а строки содержат развернутые двухмерные термограммы. Предпочтение временным функциям отдается потому, что именно они содержат «отпечатки» дефектов контролируемого объекта. Задачи факторизации не всегда имеют точное решение, поэтому чаще всего рассматривают приближенные решения.

Результатом активного ТК является последовательность ИК термограмм размерностью  $nr * nc * nt$ , где  $nr$  – число рядов в термограмме,  $nc$  – число столбцов,  $nt$  – число термограмм. Реализуя МАГК, можно анализировать как временные, так и пространственные компоненты.

В первом случае анализируют  $nt$  переменных (размерность исходных данных совпадает с числом термограмм  $nt$ ), для каждой из которых было проведено  $nr * nc$  измерений.

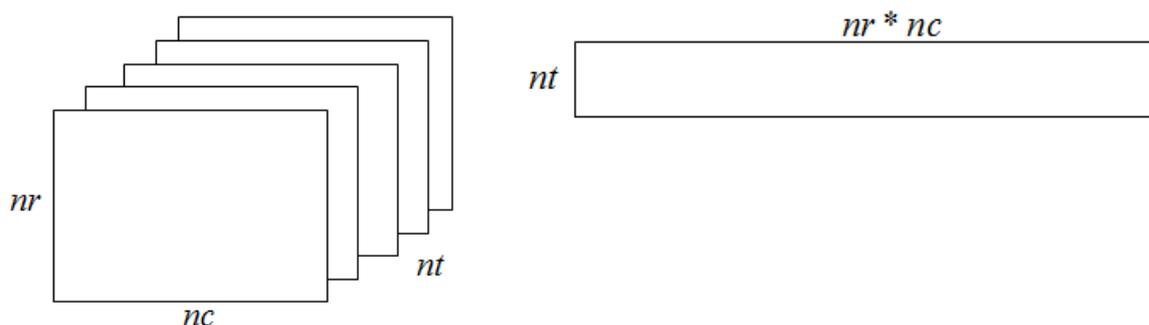


Рис. 2. Преобразование термографических данных из трехмерной матрицы в двухмерную матрицу

В случае пространственных компонент анализируют  $nr * nc$  переменных, для каждой из которых проводится  $nt$  измерений. После применения МАГК и уменьшения размерности остаются несколько переменных, отражающих связь исходных переменных между собой во времени.

Следует заметить, что анализ пространственных компонент трудновыполним и с вычислительной точки зрения. Например, типичными параметрами активного ТК являются:  $nr = 240$ ,  $nc = 320$  и  $nt = 150$ , то есть анализу подлежит последовательность из 150 термограмм стандартным форматом 320x240. Тогда размер ковариационной матрицы временных и пространственных компонент составляет соответственно 150x150 и 76800x76800 элементов.

Вычисление ГК является полезной статистической процедурой, которая в последнее время приобретает все большее распространение в задачах распознавания образов и сжатия данных, в частности, при очень больших объемах анализируемых данных.

## 2. Примеры

### 2.1. ТК композиционных материалов

Активный ТК зарекомендовал как один из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля композиционных материалов, поэтому большая часть иллюстраций применения МАГК, приведенных ниже, относится к этим материалам.

В результате ТК стандартного образца углепластикового композита толщиной 5 мм, содержавшего 5 искусственных дефектов, с помощью тепловизора AGEMA 900 было зарегистрировано 25 термограмм, отражающих как процесс нагрева изделия в течение 4,4 с, так и его последующего охлаждения. В «оптимальной» термограмме (Рис. 3) отчетливо видны зоны неравномерного нагрева двумя лампами в левой и правой частях термограмм, которые ухудшают обнаружение наиболее глубоких дефектов.

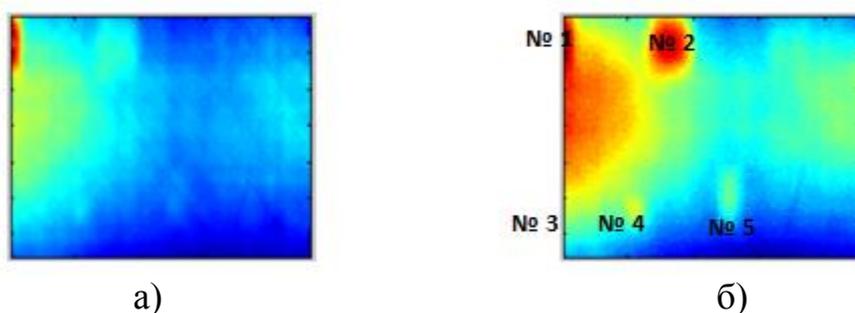


Рис. 3. Результаты ТК углепластикового композита толщиной 5 мм (глубина дефектов № 1, 3, 4 - 1,3 мм, глубина дефектов № 2, 5 - 2,6 мм): а – конец нагрева; б – «оптимальная» термограмма

Следует отметить, что в исходной последовательности были усечены границы исходных термограмм, поскольку в них имелись области, не относящиеся к объекту контроля. Усечение границ позволило значительно повысить так называемую «видность» дефектов, поскольку значения рассеивающей матрицы зависят от выбранной зоны.

К данной последовательности ИК термограмм был применен МАГК и Фурье-анализ и для каждого дефекта было определено отношение сигнал/шум  $SNR$  (Табл. 1), причем принималось во внимание, что различные дефекты создавали максимальные значения  $SNR$  в различных изображениях исходной последовательности, а также главных компонент или фаз Фурье. Принято стандартное определение  $SNR$ :

$$SNR = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}, (3)$$

где  $\bar{T}_d, \bar{T}_{nd}$  – средние температуры в областях, выбранных оператором в качестве дефектной и бездефектной;  $\sigma_{nd}$  – стандартное отклонение температуры в бездефектной области. В качестве бездефектных выбирались зоны вблизи каждого дефекта площадью, приблизительно равной площади соответствующего дефекта, поэтому значения  $SNR$  велики даже в исходных изображениях. Во всяком случае, из таблицы 1 следует, что компьютерная обработка данных значительно повышает исходные значения  $SNR$  (случаи, когда  $SNR$  в исходных термограммах выше, чем в обработанных, очевидно, связаны с особенностями выбора дефектных и бездефектных зон и не отражают общей тенденции). Оба метода – МАГК и Фурье анализ – принимают во внимание тотальные особенности поведения температуры во времени и поэтому обеспечивают близкие значения  $SNR$ . Заметим, что некоторые эксперты считают, что получаемые в результате одномерной

Фурье-обработки фазограммы обеспечивают оптимальное выявление дефектов в ТК, поэтому другие алгоритмы анализа данных ТК часто сравнивают именно с Фурье-анализом.

Повышение отношения сигнал/шум путем компьютерной обработки результатов ТК углепластикового композита (Рис. 3) Таблица 1

№ дефекта	Максимальное отношение сигнал/шум $SNR$ *		
	Исходная последовательность	МАГК	Фурье-анализ (фазограмма)
1	33,5 (18)	41,6 (2)	41,9 (2)
2	4,9 (22)	13,6 (2)	9,8 (2)
3	12,1 (18)	10,3 (2)	11,9 (2)
4	3,87 (15)	16,1 (2)	16,5 (2)
5	18,5 (6)	10,8 (1)	5,1 (2)

\* Для каждого дефекта приведены максимальное (по модулю) отношение сигнал-шум и номер соответствующего изображения в скобках.

Особенности МАГК иллюстрируются данными таблицы 2, где приведен вклад каждой из 25-ти компонент в общий разброс данных

Вклад компонент в общий разброс данных при ТК углепластика Таблица 2

Компоненты	Вклад компонент, %				
	(№1)	(№2)	(№3)	(№4)	(№5)
с 1 по 5	97.1279	2.1715	0.3436	0.1282	0.0205
с 6 по 10	0.0120	0.0114	0.0112	0.0110	0.0109
с 11 по 15	0.0106	0.0106	0.0105	0.0104	0.0104
с 16 по 20	0.0103	0.0102	0.0102	0.0101	0.0099
с 21 по 25	0.0098	0.0098	0.0097	0.0096	0.0095

Видно, что первая компонента содержит 97% от общей вариации данных, хотя с точки зрения «видности» дефектов на (Рис. 3) наиболее информативными являются 2, 3, 4 и 5-я компоненты. По-видимому, увеличить количество значимых главных компонент и таким образом

улучшить детальность анализа различных параметров ТК можно, увеличивая число записываемых термограмм  $nt$ .

А также особенности МАГК иллюстрируются данными, изображениями первых 5-ти главных компонент на Рис. 4.

В таблице 3 проиллюстрирована статистическая связь первых 5-ти исходных изображений и соответственно первых 6-ти компонент.

Результаты представлены в виде матрицы, строки которой отражают исходный набор переменных (пять термограмм), а столбцы отражают шесть новых переменных (проекции исходного набора на главные компоненты). Элементы матрицы отражают взаимную корреляцию между соответствующими переменными.

Интерпретация первых 5-ти компонент при ТК углепластика Таблица 3

Исходные изображен ия	Взаимная корреляция главных компонент (ГК) и исходных изображений					
	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	ГК5	ГК6
1	0.0235	0.4521	-0.6042	0.6263	0.1845	0.0269
2	0.9475	0.2185	-0.2139	0.0129	-0.0500	0.0237
3	0.9736	0.2010	-0.0879	-0.0217	-0.0196	0.0124
4	0.9811	0.1820	-0.0396	-0.0244	-0.0030	0.0097
5	0.9863	0.1584	-0.0136	-0.0176	-0.0010	0.0093

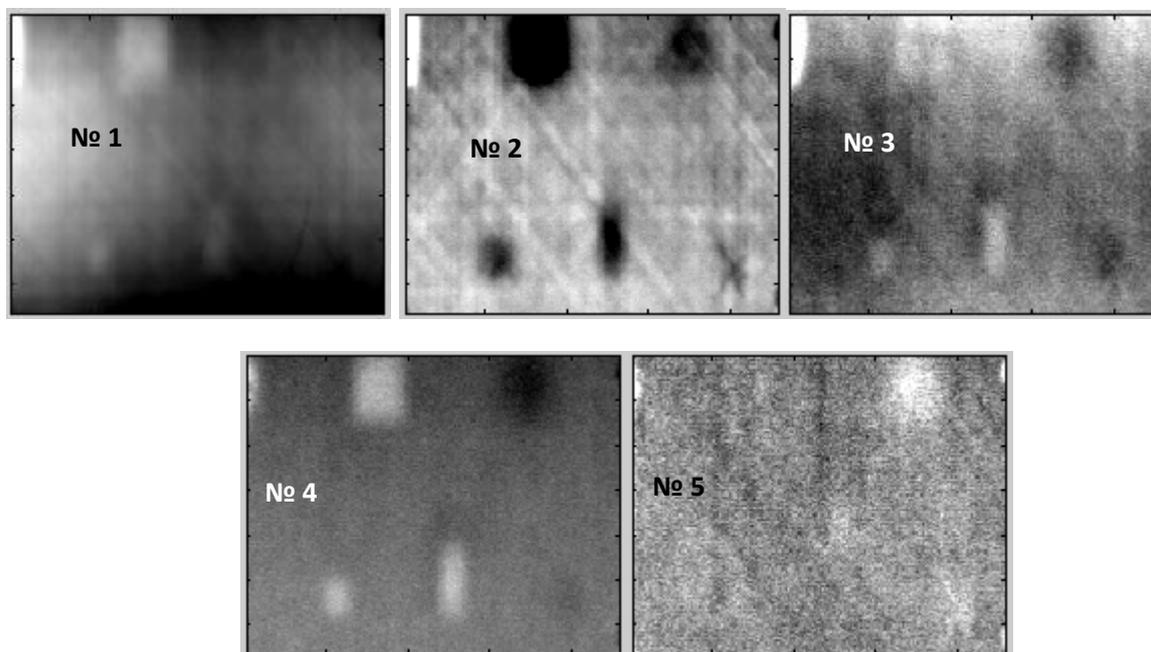


Рис. 4. Изображения главных компонент для результатов ТК углепластика

Первая компонента обладает высоким коэффициентом взаимной корреляции практически со всеми термограммами (за исключением первой, которая описывает состояние изделия перед началом нагрева). По-видимому, эта компонента отражает некоторые постоянные особенности нагрева, присутствующие во всей последовательности термограмм, например, неоднородность нагрева и изменение коэффициента поглощения.

Вторая компонента хорошо коррелирует с термограммами № 14 – № 25, отражая дефекты, расположенные вблизи от контролируемой поверхности.

Третья главная компонента имеет высокий коэффициент корреляции с изображениями № 1, 2, 3, 10-12, 16-24. Пятая компонента хорошо коррелирует с изображениями № 1, 2, 22-25. Компоненты 3, 4 и 5 коррелируют с термограммами 21 – 25, где лучше проявляются глубокорасположенные дефекты.

Пример ТК реального изделия цилиндрической формы, выполненного из углепластика толщиной 10 мм, приведен на Рис. 5.

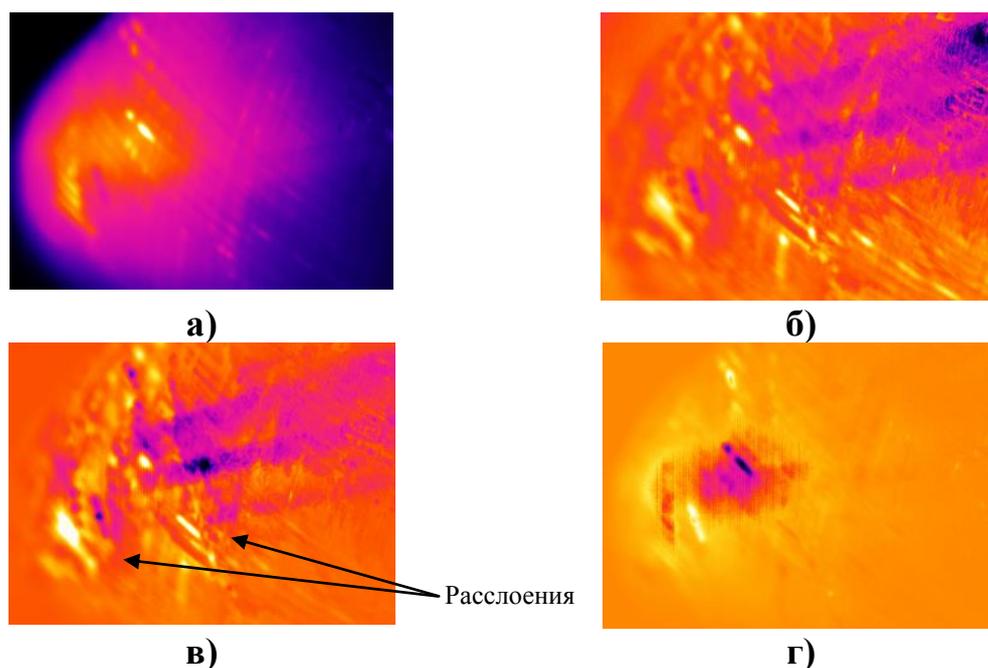


Рис. 5. Контроль расслоений в углепластиковом композите, полученном методом намотки:

а – оптимальная исходная термограмма ( $SNR=7,6$ );

б – фазограмма ( $SNR=11,0$ );

в – главная компонента №2 ( $SNR=11,1$ );

г – главная компонента №4

Нагрев осуществляли ламповым нагревателем мощностью 30 кВт в течение 10-15 с, запись термограмм производили с частотой 30 Гц на тепловизор ThermoCAM SC 3000. Интерпретация исходных термограмм (Рис. 5 а) была затруднительной из-за цилиндрической формы изделия и анизотропии композита, изготовленного способом перекрестной намотки. Приемлемое качество контроля было обеспечено фазограммой (Рис. 5 б), где отчетливо видны многочисленные расслоения вытянутой формы, что обусловлено технологией намотки с использованием пряжей углепластиковых волокон (горизонтальные полосы на изображении обусловлены поверхностными царапинами). Практически идентичное изображение структуры изделия было получено с помощью МАГК (Рис. 5 в), причем отдельные главные компоненты подчеркивают различные дефекты (сравнить изображения на рис. 5в и 5г) Заметим, что в данном изделии возможны дефекты другого вида, а именно зоны избыточного наполнителя (эпоксидной смолы).

### **3. Заключение**

Рассмотрены принципы и особенности использования статистического МАГК для обработки последовательностей ИК термограмм, получаемых в результате активного ТК. Данный метод известен при анализе больших массивов статистических данных с целью сокращения избыточности информации и классификации наиболее значимых информативных признаков. В последние годы МАГК все чаще используется в неразрушающем контроле. В ТК он позволяет преобразовать исходные ИК термограммы в последовательность изображений главных компонент, из которых первые 3-5 изображения несут наиболее значимую информацию о дефектах и помехах.

Существенным моментом применения МАГК является необходимость усреднения данных, которое может быть выполнено как по пространству, так и по времени. В силу физики ТК целесообразно усреднение температурных изменений во времени, кроме того, усреднение по пространству приводит к недопустимо большому времени счета.

В результате анализа «чистой» (искусственной) последовательности ИК термограмм предсказано, что МАГК не обеспечивает полного разделения информации о дефектах и помехах, обусловленных неравномерным нагревом, изменениями излучательно-поглощательных свойств и анизотропией материала, однако способен

значительно улучшить визуальное восприятие ИК термограмм, в частности, повысить отношение сигнал/шум.

Эффективность МАГК проиллюстрирована при анализе экспериментальных данных, полученных при ТК композиционных материалов.. Показано, что качество изображений главных компонент близко к фазограммам, получаемым при одномерной Фурье-обработке ИК изображений, которая часто рассматривается как наиболее эффективная процедура обработки данных в ТК.

### **Список информационных источников**

1. Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М., Радио и связь, 1984.

<http://tndtsoft.ru>

2. В.П. Вавилов ИнфракраснаяТермография и Тепловой контроль, Томск 2012

3. Вавилов В.П., Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье.-Дефектоскопия, 1999, № 2, с. 58-71.

4. “Factor Analysis”. -

[http://www.stat.psu.edu/~jglenn/stat505/16\\_factor/05\\_factor\\_princomp.html](http://www.stat.psu.edu/~jglenn/stat505/16_factor/05_factor_princomp.html).

### **РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ОРГАНИЗАЦИИ**

*Редькина А.В.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Янушевская М.Н., ст. преподаватель кафедры  
физических методов и приборов контроля качества*

Для любой организации одной из актуальных задач является построение эффективной системы менеджмента, которая будет обеспечивать выполнение задач организации и достижение успеха во внешней среде. В условиях острой конкуренции и снижения покупательного спроса населения как следствие финансового кризиса происходит переориентация процесса управления – с управления отдельными ресурсами на управление бизнес-процессами, связывающими воедино деятельность взаимодействующих подразделений организации. Такой подход в менеджменте позволяет сконцентрироваться на получении конечного результата и повышает степень скоординированности выполнения операций. Основное