

УДК 678-419.8:004.9

**И. И. Деревянко**, инженер II категории  
конструкторского бюро “Южное”  
**Ю. А. Кочусов**, начальник группы конструкторского  
бюро “Южное”  
**А. М. Потапов**, кандидат технических наук,  
начальник комплекса конструкторского бюро “Южное”  
**А. А. Самусенко**, ведущий инженер  
конструкторского бюро “Южное”

### АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПЫТНОЙ КОНСТРУКЦИИ МСО ИЗ ПКМ

*Предложен визуально-аналитический алгоритм обработки тензометрических измерений МСО из ПКМ, полученных при статических испытаниях, которые имитируют условия транспортирования и полета опытной конструкции.*

*Запропоновано візуально-аналітичний алгоритм обробки тензометричних вимірювань МСО з ПКМ, отриманих під час статичних випробувань, котрі імітують умови транспортування і польоту дослідної конструкції.*

*The visual and analytical algorithm processing of tensometric measurements ISS made by PCM obtained in static tests that simulate the conditions of transportation and flight test construction was proposed.*

**Ключевые слова.** Композиционный материал, межступенной отсек, обработка измерений, информативные параметры, деформация.

**Введение.** Среди узлов ракетносителей особое место занимают конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Одной из важных задач при создании таких конструкций является оценка конструктивно-технологических решений, закладываемых в конструкцию узла. Решение задач, таких как оценка качества композита, статистический расчет прочности трехслойных конструкций, определение несущей способности цилиндрических оболочек из композитов, представлено в работах [1–3]. Отличием данной статьи является уникальность объекта контроля – подобные крупногабаритные конструкции не изготавливались ранее из ПКМ, что потребовало разработки новых информативных параметров и методики обработки данных.

Объект исследования представляет собой межступенной отсек (МСО) – технологически сложную конструкцию, характеризующуюся совокупностью особенностей конструктивно-технологических решений применения углепластика: верхний и нижний шпангоуты, фитинги, трехслойная оболочка, окантовки люков, места соединения этих элементов между собой [4].

На рис. 1 приведена схема разбиения развертки внешней поверхности корпуса межступенного отсека РКН “Циклон-4”. Как видно, вся поверхность разбита на равнопропорциональные зоны (квадраты). Каждый квадрат представляет собой зону отдельного тензометрического измерения. Поверхность разбита на 10 горизонтальных делений – осевые направления, 16 вертикальных – медианные направления. Каждое из направлений характеризуется своими конструктивно-технологическими особенностями, например, ось 1 – верхний шпангоут, 2 – район перехода трехслойной конструкции к шпангоуту, 3 – район верхних окон, 5 – трехслойная конструкция и т. д.

© И. И. Деревянко, Ю. А. Кочусов, А. М. Потапов, А. А. Самусенко, 2013



Рис. 1. Схема разбиения развертки внешней поверхности корпуса (номера осей: 1, 9 – верхний и нижний шпангоуты; 2, 8 – район перехода трехслойной конструкции к соответственно верхнему и нижнему шпангоутам; 3, 4 – район верхних и нижних окон; 4, 6 – выше и ниже средней линии; 5 – средняя линия)

В каждом квадрате расположено 4 тензодатчика, производящих следующие замеры: 1-й и 2-й – горизонтальное и вертикальное направления на наружной поверхности, 3-й и 4-й – на внутренней поверхности изделия.

*Проведение испытаний.* Проведено 4 этапа статических испытаний, которые имитируют нагружение конструкции во время эксплуатации:

- нагружение узла изгибающим моментом, осевой и поперечной силами имитирующими транспортировку РКН к месту старта;
- нагружение узла изгибающим моментом, осевой и поперечной силами имитирующими полет РКН на АУТ – 3 направления приложения сил.

Нагружение узла производилось в 6 стадий: стадия 4 соответствует эксплуатационным нагрузкам, стадия 6 – расчетным нагрузкам.

В данной статье приведены результаты обработки и статистического анализа для шестой стадии нагружения.

**Постановка задачи.** Цель статьи – разработка алгоритма проведения вычислительных экспериментов для проектирования информационно-аналитической системы поддержки принятия решения о применимости конструктивно-технологических решений по использованию углепластика в конструкции МСО.

**Результаты исследования.** Алгоритм обработки измерений. Каждый из этапов статических испытаний отражает свои особенности эксплуатации, поэтому, в первую очередь, они должны анализироваться отдельно от остальных. Алгоритм анализа представлен на примере этапа “Полет-1”.

Первый шаг алгоритма – составление таблицы деформаций и представление ее в цветовой гамме (создание цветовой развертки). Таблица создается следующим образом: развертка поверхности отсека разбивается на квадраты, каждый из них соответствует значению деформации. Реальная деформация представляется как корень из суммы квадратов измерений показаний тензодатчиков в вертикальном и горизонтальном направлениях. Недостатком при этом является неясность в работе материала (материал растягивается или сжимается). Рассмотрение каждого из направлений в отдельности приводит к дополнительной информации о состоянии дефектности конструкции. При этом описывают работу материала (сжатие – отрицательные значения, растяжение – положительные).

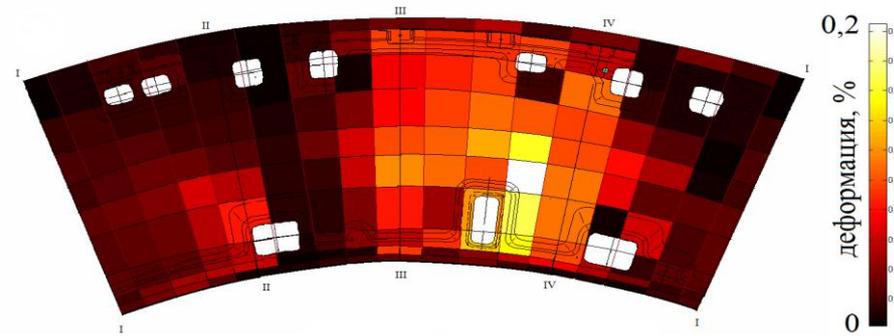


Рис. 2. Распределение показаний тензодатчиков, установленных на наружной поверхности МСО. Значения реальной деформации

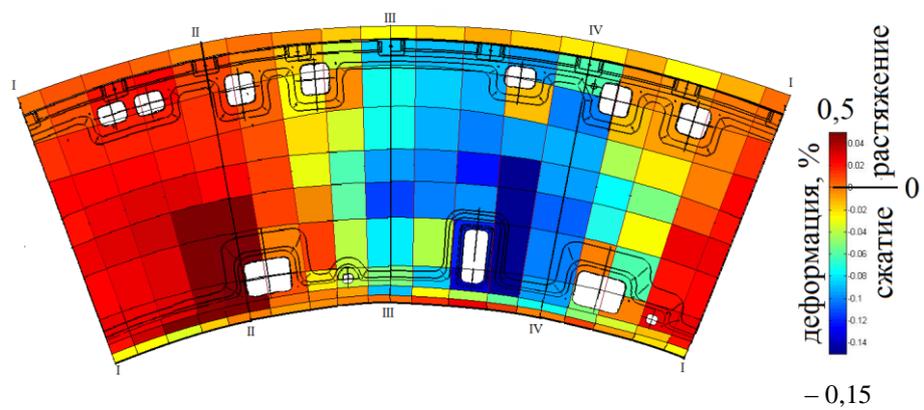


Рис. 3. Распределение показаний тензодатчиков, установленных на наружной поверхности МСО. Значения деформации вертикальной составляющей

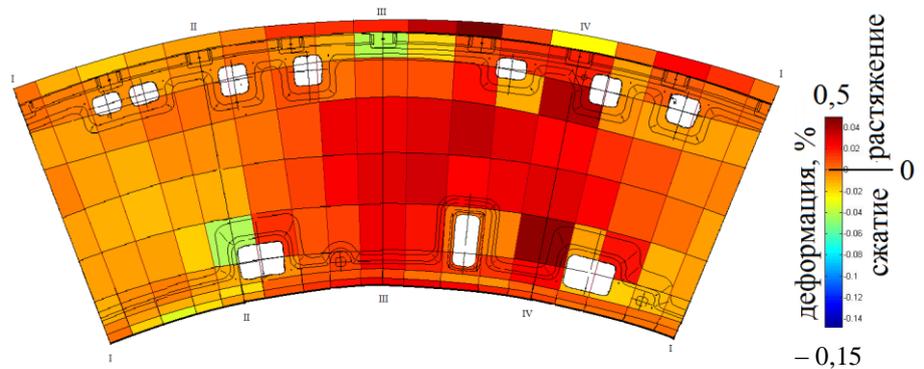


Рис. 4. Распределение показаний тензодатчиков, установленных на наружной поверхности МСО. Значения деформации горизонтальной составляющей

При визуальном представлении таблицы в цветовой гамме (рис. 2–4) каждому значению деформаций соответствует свой цвет и тон. При обработке значений реальной деформации шкала представляет собой переход от минимальных деформаций к максимальным (от темного к светлому), а при обработке составляющих деформаций – переход от сжатия к растяжению (от синего к красному).

Приведенная визуальная информация о распределении величин деформаций, упрощает анализ, делает его более наглядным и понятным. На рисунке наблюдаются как зоны максимального растяжения, так и зоны максимального сжатия.

Второй шаг алгоритма – обработка измерений относительно условной разбивки поверхности на оси и медианы. Из конструктивных особенностей и испытаний известно, что величины эквивалентных нагрузок и деформации вдоль каждой оси различные. Для анализа этой особенности были построены круговые диаграммы значений деформаций по каждой оси, а также график средних по модулю значений величин деформаций (рис. 5, 6).

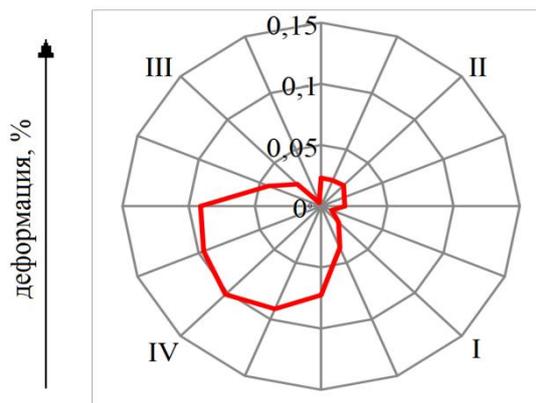


Рис. 5. Круговые диаграммы модуля значений деформаций на 4 и 8 осях



Рис. 6. График средних по модулю значений деформаций по осям

Полученная визуализация указывает на изменение и переход деформаций, определяет средние максимальные и минимальные деформации в осях.

При обработке измерений по направлениям информативными параметрами также

---

являются показатели статистических закономерностей, такие, как среднее арифметическое  $\bar{x}$  и разброс значений  $\sigma$  [5]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i), \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество измерений;  $x(i)$  –  $i$ -ое измерение деформации в выборке.

Они подтверждают, описывают и дополняют информацию предыдущих графиков. Их значения несут информацию о величинах деформаций, разбросе по направлениям, а также в числовой форме классифицируют оси.

В таком же порядке необходимо проводить обработку измерений по направлению медиан.

Показатели статистических закономерностей также характеризуют объект в целом. Данные показатели позволяют сравнивать между собой как этапы нагружения узла, так и аналогичные нагружения при последующих испытаниях.

Третий шаг алгоритма – обнаружение зон повышенной опасности. При этом принято, что резкие перепады скорости изменения деформации по объекту характеризуют эти зоны. В нашем случае скорость изменения деформаций  $S_i$  – это первая производная от величин деформаций. При обработке показаний датчиков использовалась следующая формула [6]:

$$S_i = \frac{x_i - x_{i+1}}{l_i}, \quad (2)$$

где  $x_i$  и  $x_{i+1}$  – соседние измерения деформаций;  $l_i$  – расстояние между ними.

Анализ проводился по направлениям осей и медиан, а выявленные аномальные зоны в каждом из них формируют общий результат.

Особенностью по направлению осей является то, что измерения в сетке находятся на равном расстоянии друг от друга, и формула в данном случае принимает вид

$$S_i = x_i - x_{i+1}. \quad (3)$$

Полученные результаты после преобразования нуждаются в нормировке, необходимой для сравнения результатов между собой. Нормировка  $Sn_i$  проводится по максимальному значению  $\max(S)$  по формуле

$$Sn_i = \frac{S_i}{\max(S)}. \quad (4)$$

Аномальными являются те зоны, деформации в которых превышают порог. Порог  $p$  предлагается определять как “три средних”, он находится по формуле

$$p = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5)$$

Результаты этих преобразований показаны на рис. 7.

Таким образом, можно получить визуальное отображение зон повышенной опасности по внешней поверхности узла.

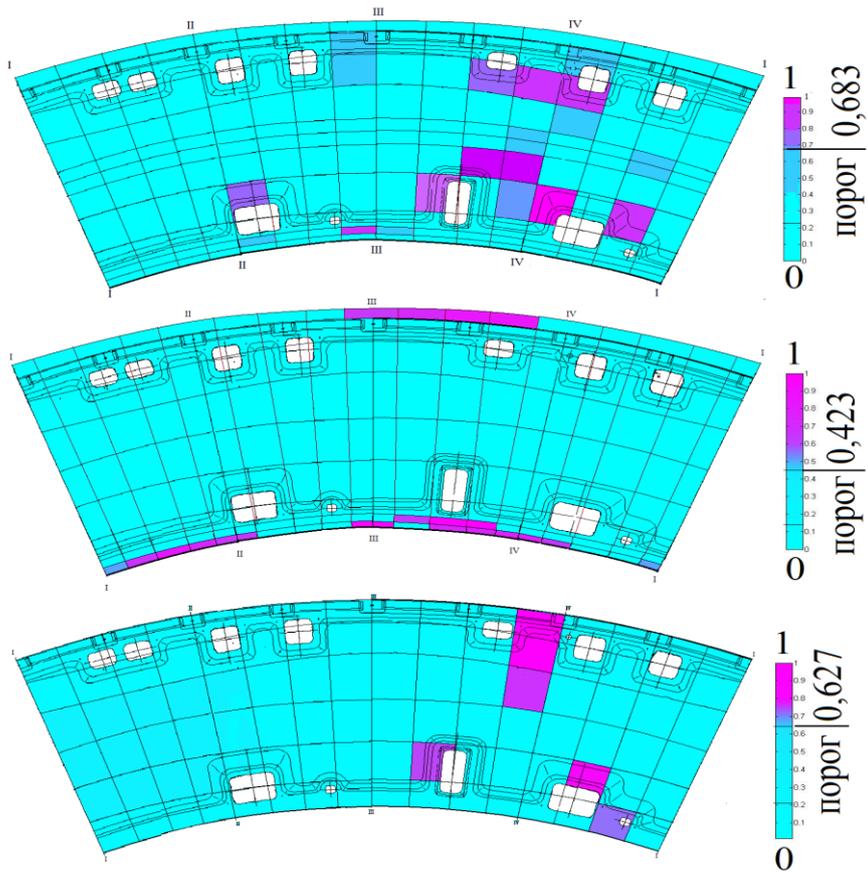


Рис. 7. Распределение зон повышенной опасности по направлению:  
 1 – осей; 2 – медиан с учетом шпангоута; 3 – медиан без учета шпангоута

Четвертый шаг алгоритма – обработка измерений, направленная на сравнение деформаций растяжения и сжатия. Информативными параметрами при этом являются процентная разность сжимающих и растягивающих деформаций, площади деформаций и процентная разность площадей. Их формулы выглядят следующим образом:

$$d_{\text{деф}}^{\%} = \begin{cases} 100 \times \left( \frac{1 - \bar{x}_{\text{раст}}}{|\bar{x}_{\text{сж}}|} \right); & \text{если } |\bar{x}_{\text{сж}}| > \bar{x}_{\text{раст}} \\ -100 \times \left( \frac{1 - |\bar{x}_{\text{сж}}|}{\bar{x}_{\text{раст}}} \right); & \text{если } |\bar{x}_{\text{сж}}| < \bar{x}_{\text{раст}} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $d_{\text{деф}}^{\%}$  – процентная разность деформаций;  $\bar{x}_{\text{раст}}$  и  $\bar{x}_{\text{сж}}$  – среднее от растягивающих и сжимающих значений деформаций.

$$d_S^{\%} = \begin{cases} 100 \times \left( \frac{1 - \sum S_p}{\sum S_{сж}} \right); & \text{если } \sum S_{сж} > \sum S_p \\ -100 \times \left( \frac{1 - \sum S_{сж}}{\sum S_p} \right); & \text{если } \sum S_{сж} < \sum S_p \end{cases}, \quad (7)$$

где  $d_S^{\%}$  – процентная разность площадей;  $\sum S_p$  и  $\sum S_{сж}$  – сумма площадей, в которых значения деформаций соответственно растягивающие и сжимающие.

Важно отметить, что знак “минус” в результирующих значениях процентной разности деформаций свидетельствует о том, что величина значений растягивающих деформаций больше сжимающих. А знак “минус” в результирующих значениях процентной разности площадей свидетельствует о том, что размер площади, на которой деформации растягивающие, больше площади, на которой деформации сжимающие.

Пятый шаг алгоритма – обработка измерений, направленная на сравнение значений деформаций, полученных на наружной поверхности объекта, и деформаций, полученных в тех же точках на внутренней обшивке узла. С этой целью внутренняя поверхность подвергается тому же объему и последовательности исследований, что и наружная.

Во-первых, необходимо сравнить значения величин деформаций в соответствующих точках. В качестве информативного параметра предлагается использовать цветовую развертку конструкции, в основу которой положены значения величин различий деформаций. Данное значение представляет собой модуль разности измерений соответствующих точек на внутренней и внешней обшивке (рис. 8).

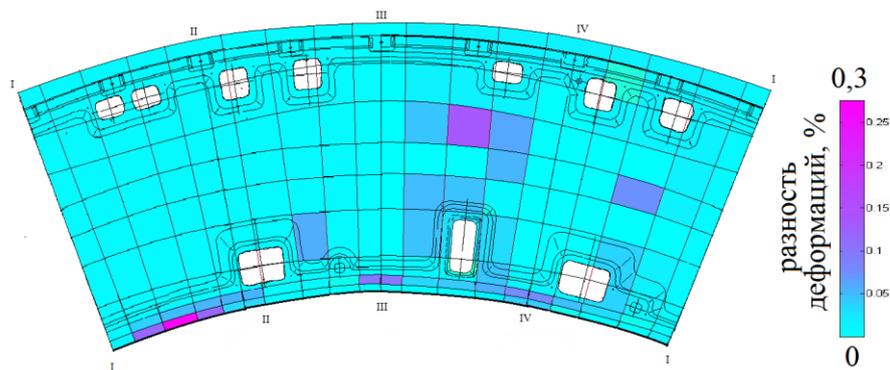


Рис. 8. Цветовая развертка объекта со значениями величин различий деформаций

Во-вторых, информативными параметрами являются средние от модулей измерений внутренней и внешней поверхности, а также процентная разность средних от модулей измерений, которая указывает, на сколько процентов величины деформаций внутренней поверхности больше или меньше величин деформаций наружной поверхности. Процентная разность свидетельствует о равномерности нагружения обшивок, ее формула выглядит так:

$$\Delta x_{обш}^{\%} = \frac{100 \times (\bar{x}_{нар} - \bar{x}_{вн})}{\max(\bar{x}_{нар}, \bar{x}_{вн})}, \quad (8)$$

где  $\Delta x_{обш}^{\%}$  – процентная разность средних от модулей измерений;  $\bar{x}_{нар}$  и  $\bar{x}_{вн}$  – средние значения модулей измерений соответственно на наружной и внутренней обшивке.

Важно отметить, что знак “минус” в результирующих значениях процентной разности средних от модулей измерений свидетельствует о том, что величины деформаций внутренней поверхности больше величин деформаций наружной поверхности.

В-третьих, информативными могут считаться размеры площадей на внутренних и наружных обшивках, у которых величины деформаций на одной из обшивок больше другой, а также их процентная разность.

Формула нахождения площади, у которой деформации больше на наружной поверхности  $S_{нар}$ , выглядит следующим образом:

$$S_{нар} = \sum S_i \cdot \begin{cases} 1; & \text{если } |x_{нар}|_i > |x_{вн}|_i \\ 0; & \text{если } |x_{нар}|_i < |x_{вн}|_i \end{cases} \quad (9)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -го квадрата на поверхности конструкции;  $|x_{нар}|_i$  и  $|x_{вн}|_i$  – значение модуля деформации в  $i$ -м квадрате на соответственно наружной и внутренней поверхности.

Определение площади узла, на которой деформации больше на внутренней поверхности  $S_{вн}$ , выглядит следующим образом:

$$S_{вн} = \sum S_i \cdot \begin{cases} 0; & \text{если } |x_{нар}|_i > |x_{вн}|_i \\ 1; & \text{если } |x_{нар}|_i < |x_{вн}|_i \end{cases} \quad (10)$$

Шестой шаг алгоритма – обработка измерений, направленная на исследование распределений деформаций конкретных датчиков на разных этапах нагружения. На рис. 9 представлены кривые зависимостей тех датчиков, которые привлекли к себе внимание на предыдущих стадиях обработки результатов.

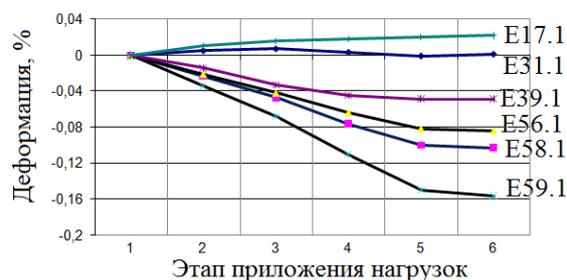


Рис. 9. Графики деформаций тензодатчиков

Седьмая часть алгоритма – по результатам частей 1–6 необходимо представить обобщенные выводы, которые должны содержать перечень всей информации по обработке измерений опытной конструкции.

**Выводы.** 1. Рассмотрена и предложена совокупность информативных параметров для качественной оценки применимости конструктивно-технологических решений в конструкции МСО из ПКМ: развертки распределения деформаций, зоны максимальных деформаций, круговые диаграммы деформаций, графики распределения средних значений деформаций, показатели статистических закономерностей (средние, разброс), зоны повышенной

---

опасности, сравнение сжимающих и растягивающих деформаций, сравнение значений деформаций наружной и внутренней поверхности, графики деформаций тензодатчиков.

2. Разработан порядок проведения вычислительных экспериментов для проектирования информационно-аналитической системы поддержки принятия решения о применимости конструктивно-технологических решений по использованию углепластика в конструкции МСО.

3. Предложен визуально-аналитический метод представления информации, позволяющий дать оценку для принятия решения о применимости конструкции и качестве исследуемого объекта по результатам статических испытаний МСО из ПКМ, который при дальнейших исследованиях может быть использован для разработки методики обработки результатов тензометрических измерений на аналогичных объектах из ПКМ.

#### Литература

1. Ривкинд В. Н. Условия контроля качества однонаправленного композита / В. Н. Ривкинд, А. Ф. Кемпинский, М. В. Гершберг // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов : сборник статей / под ред. В. А. Латишенко. – Рига : Зинате, 1986. – С. 28–36.

2. Ужполявичус Б. Б. Статистический расчет при контроле прочности материала и сопротивления несущих конструкций по результатам неразрушающих испытаний / Б. Б. Ужполявичус // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов : сборник статей / под ред. В. А. Латишенко. – Рига : Зинате, 1986. – С. 50–56.

3. Богданович А. Е. Анализ несущей способности цилиндрических оболочек из композитов с учетом неосесимметричных технологических несовершенств / А. Е. Богданович // Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов : сборник статей / под ред. В. А. Латишенко. – Рига : Зинате, 1986. – С. 88–96.

4. Лизин В. Т. Проектирование тонкослойных конструкций : монография / В. Т. Лизин, В. А. Пятник. – М. : Машиностроение, 1976.

5. Малайчук В. П. Математическая дефектоскопия : монография / В. П. Малайчук, А. В. Мозговой. – Д. : Системные технологии, 2005.

6. Малайчук В. П. Обработка измерений и сигналов неразрушающего контроля : учебное пособие / Малайчук В. П., Петренко А. Н., Рожковский В. Ф. – Днепропетровск, 2002.