

# МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ В ОЦЕНКЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

MULTIFRACTAL PARAMETRIZATION AS METHOD OF  
TENSION ESTIMATION IN MATERIAL OF OIL AND GAS PIPELINES

УДК 620.18

**А.С. СИЛЬВЕСТРОВ**  
**А.Д. АНВАРОВ**

соискатель, Главный инженер проектов ООО «Астрапроект»  
к.т.н., Ведущий инженер ФГБОУ ВПО  
«Казанский национальный исследовательский технологический  
университет» (ФГБОУ ВПО «КНИТУ»)  
д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «КНИТУ»

Казань  
SilvestrovAS@mail.ru

**В.А. БУЛКИН**

асpirant, Chief engineer of projects of LLC «Astraproject»  
PhD, Leading engineer of Kazan  
National Research Technological University  
Doctor of Sc., Full Professor of  
Kazan National Research Technological University

Kazan

A.S. SILVESTROV  
A.D. ANVAROV

V.A. BULKIN

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**  
**KEYWORDS:**

газонефтепроводы, металлография, мультифрактальная параметризация,  
внутренние напряжения  
oil and gas pipeline, metallography, Multifractal parameterization, Internal tensions

Установлено, что характер распределения значений мультифрактальных характеристик изображений металлографических структур исследованных образцов повторяет характер распределения напряжений в материале этих образцов, что дает предпосылку разработки метода оценки фактического НДС неразрушающим способом.

It was identified that there is a correlation between the values of tensions which had been affected pipeline material and the results of multifractal parametrization of the digital images of its structure. This is a fundamental principle of the method of estimation of actual stress-strain state by nondestructive way.

Работа технических устройств, таких как магистральные трубопроводы, сопряжена со сложными условиями эксплуатации. Одной из возникающих при этом проблем является сложность анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) исследуемого участка трубопровода. Причем получить реальную картину распределения НДС часто не представляется возможным в силу специфики данного вида технических устройств опасных производственных объектов (протяженные скрытые участки трубопроводов, сложность в соблюдении

технологии укладки при строительстве, перемещение пластов земли совместно с трубопроводом при сезонных колебаниях температуры и прочее [1]).

Ранее показаны [2, 3] возможности метода мультифрактальной параметризации как метода обладающего высокой чувствительностью к изменениям механических характеристик металла. Нет сомнений в том, что изображение металлографической структуры несет огромную информацию о природе металла, при этом стандартными методами металлографии удается

извлекать лишь небольшую ее часть.

В работе [4] предложено теоретическое обоснование в применении метода мультифрактальной параметризации для установления соотношения между характером деформаций и мультифрактальными параметрами металлографической структуры, на основании которых был предложен стандартный образец металлографической структуры для проверки соответствия мультифрактальных параметров деформациям СО-МФ-1 (рис. 1) и получен патент на полезную модель №100256.

СО-МФ-1 выполняется в виде прямоугольной пластины из металла идентичного материалу контролируемого трубопровода, содержит захватные 1 и рабочую 2 части (рис. 1). В рабочей части образца выполнены вырезы с радиусом R, симметрично расположенные относительно продольной оси, образующие перешеек. Радиус R и минимальная ширина перешейка а определяются расчетным путем по соотношениям напряжений в точках на продольной оси, соответствующими пределу прочности в минимальном сечении перешейка и упругой деформации металла в начале выреза.

Для апробации данного метода были изготовлены и испытаны 2 образца (рис. 2, 3).

1-й образец изготовлен из металла аварийного запаса (с исходными свойствами и структурой), 2-й образец из металла трубопровода, отработавшего расчетный ресурс. Марка материала в обоих случаях соответствовала стали 17Г1С.

После испытаний на растяжение на рабочей части образцов были изготовлены металлографические шлифы, на ►

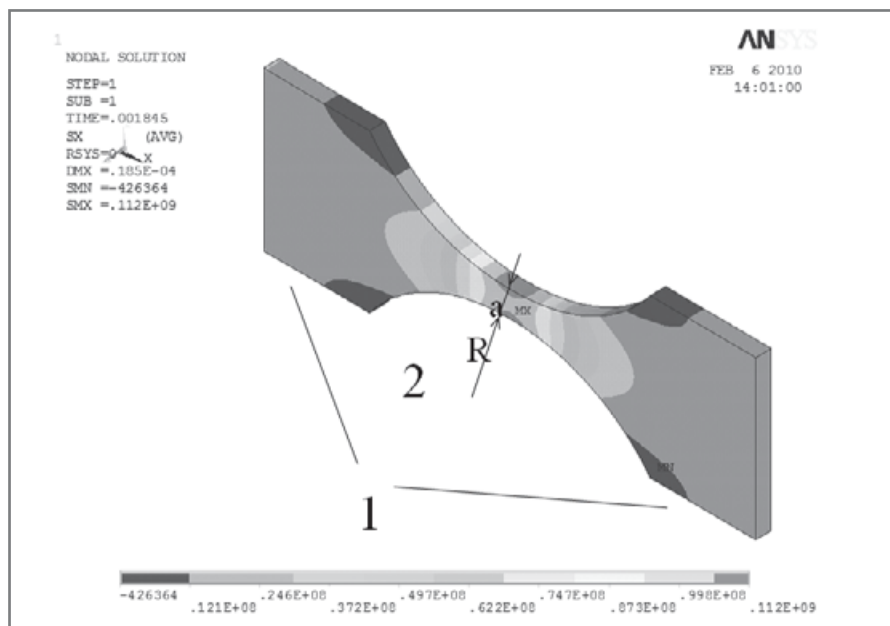


Рис.1. Устройство СО-МФ-1. Вид из программы Ansys

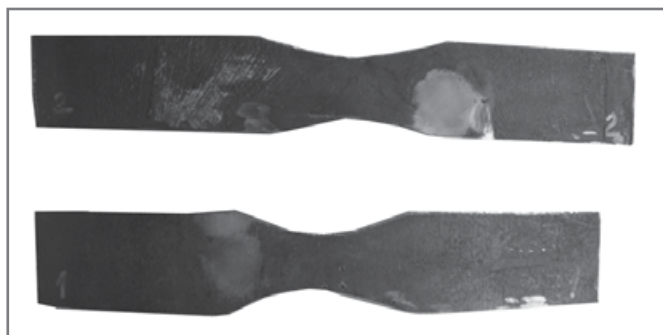


Рис. 2 Внешний вид исходных образцов

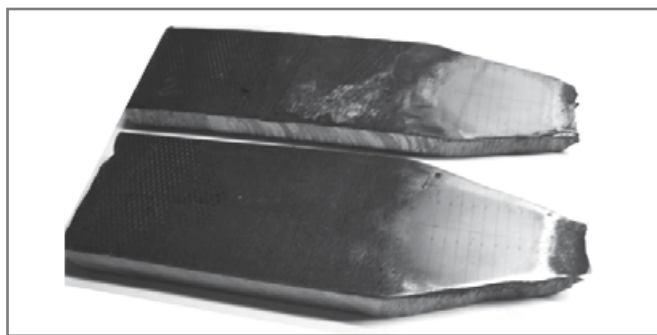


Рис. 3 Части 1-го и 2-го образцов после испытаний на растяжение с изготовленным на поверхности металлографическим шлифом

изображения которых впоследствии был проведен мультифрактальный анализ (МФА) в программе MFRDrom. Шлифы изготавливали на поверхности образца соответствующей наружной поверхности трубопровода. Для удобства анализа и привязки металлографических снимков на поверхность шлифов была нанесена сетка с шагом 3 мм.

В результате МФА были получены следующие результаты (рис. 4, 5).

На графиках в координатах однородность (F200) – упорядоченность (D1-D200) представлены результаты МФА изображений металлографической структуры участков, расположенных на разном удалении от места разрушения образцов. Средние значения полученных в результате анализа данных представлены на рис.6,7.

Как видно из графиков, характер распределения результатов МФА логично сочетается с областями распределения НДС образца (рис.1).

Проведенные исследования позволяют проводить анализ НДС образцов (например, в программе Ansys) по имеющимся данным механических испытаний с последующей привязкой расчетных данных по НДС соответствующим значениям МФА изображений структур данных областей.

Принимая во внимание, что изготовление металлографических шлифов предполагается осуществлять непосредственно на наружной поверхности действующего трубопровода, метод претендует на статус неразрушающего метода оценки фактического напряженно-деформированного состояния трубопровода. ■

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Сильвестров А.С., Булкин В.А., Анваров А.Д. Термоциклические процессы как причина КРН на магистральных газопроводах / Вестник Казанского государственного технологического университета, №18, 2011, стр.168.

2. Сильвестров А.С., Анваров А.Д., Булкин В.А. Пути совершенствования системы оценки работоспособности магистральных трубопроводов нефти и газа. / Контроль. Диагностика. - №6 - 2010, стр19-22.

3. Анваров А.Д. Возможность идентификации механических свойств металла оборудования химических производств при экспертизе промышленной безопасности на базе метода мультифрактальной параметризации / А.Д. Анваров, А.С. Маминов, В.А. Булкин, Г.В. Встовский / Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2006. - №1. – С.77-82.

4. Сильвестров А.С., Анваров А.Д., Николаев Е.И., Булкин В.А. Применение метода мультифрактальной параметризации при оценке остаточного ресурса магистральных трубопроводов / Вестник Казанского государственного технологического университета, №12, 2010, стр. 464.

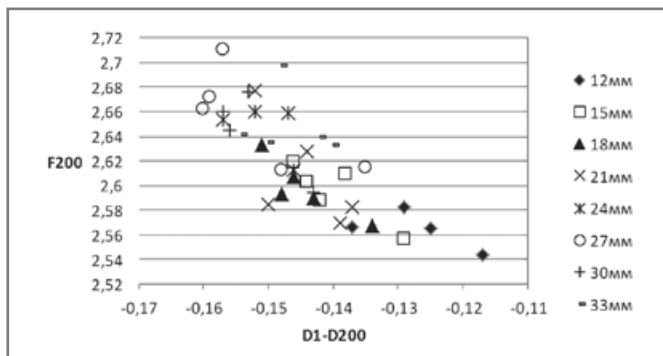


Рис. 4 Распределение значений мультифрактальных параметров 1 образца

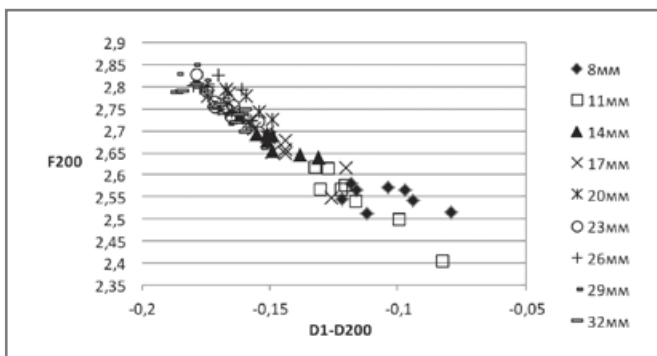


Рис. 5 Распределение значений мультифрактальных параметров 2 образца

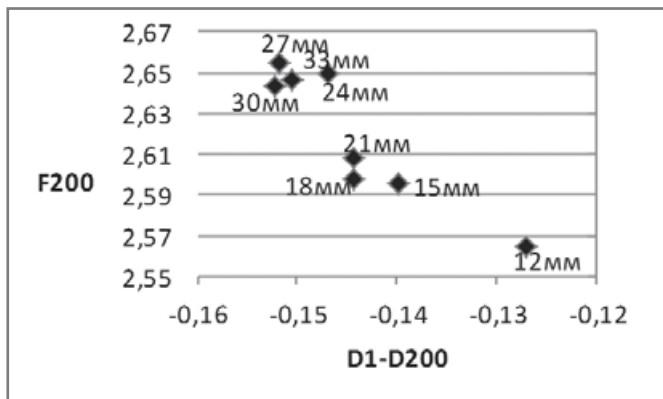


Рис. 6 Усредненные значения результатов МФА для изображений структур 1-ого образца

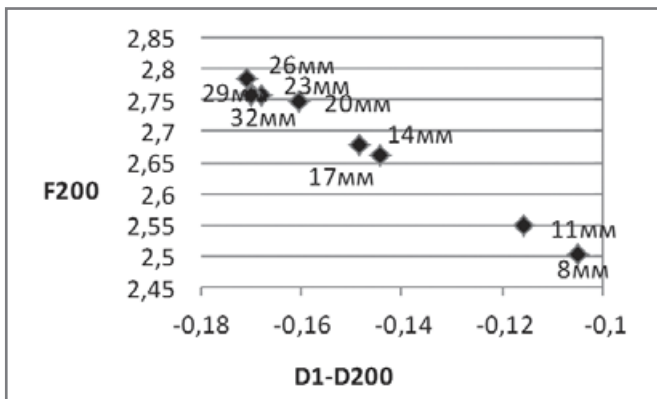


Рис. 7 Усредненные значения результатов МФА для изображений структур 2-ого образца

# НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ТЕРМОГРАФИИ

RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT AND THERMAL IMAGING METHODS

<b>P.A. РОМАНОВ</b>	аспирант СПбГУКиТ, директор по маркетингу и сбыту ООО «Балтех»	Санкт-Петербург RomanovRA@baltech.ru
<b>A.A. БЕЛОУСОВ</b>	д.т.н., профессор СПбГУКиТ	
<b>R. ROMANOV</b>	graduate student of SPbGUKiТ, Sales and Marketing Manager of Baltech Ltd.	Saint-Petersburg
<b>A. BELOUSOV</b>	Doctor of Engineering Science, professor SPbGUKiТ	
<b>КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:</b> <b>KEYWORDS:</b>	термография, тепловизионная диагностика, термограмма thermal imaging, thermal imaging diagnostics, thermal image	

В статье рассматриваются проблемы обеспечения надежности энергетического оборудования методами термографии.

The article is concerned with problems of reliability assurance of power equipment using thermal imaging methods.

Современный уровень развития технологич- ный энергетических предприятий предъявляет высокие требования к надежности и безопас- ности оборудования, а также к эффективной и экономичной его работе. Надежность энер- гетического оборудования закладывается при проектировании и поддерживается при эксплуатации. Периодические плановые ре- монты энергетического оборудования при эксплуатации призваны поддержать заложен- ный коэффициент надежности с помощью замены износившихся деталей, инструмен- тария и средств технической диагностики. На- дежность оборудования базируется на обя- зательном применении новейших средств, методов контроля и диагностики энергетиче- ского оборудования и требует комплексного подхода к решению инженерно-технических проблем.

В настоящее время в энергетике при- меняется 9 видов и более 50 физических методов неразрушающего контроля, при- менимых в отечественной и зарубежной практике для диагностики технического со- стояния энергомеханического оборудования (электрооборудование, электродвигатели, турбины, дымососы, вентиляторы, редукто- ры, компрессоры и пр.).

Обслуживание оборудования по факти- ческому техническому состоянию или про- активное базируется на применении ряда методов технической диагностики и распо- знавания технических состояний, которые, в сочетании, позволяют определять большую часть различных дефектов, возникающих в технологическом оборудовании предприятия. Для того чтобы использовать определенные виды диагностики, необходимо разбить обо- рудование по искомым диагностическим при- знакам технического состояния.

Большинство энергетического оборудо- вания, находящегося в эксплуатации теоретически не рассчитано на всевозможные эксплуатационные воздействия и не испы- таны на них при выпуске с заводов, так как отсутствует методики ресурсных испытаний у производителей данного оборудования. Поэтому в эксплуатации приходится решать две основные проблемы с помощью средств технической диагностики:

1. Выявлять развивающиеся дефекты, которые появляются после обычных экс- плуатационных воздействий и естественного износа;
2. Определять остаточный ресурс или возможность надежной эксплуатации без

капитального ремонта.

Для выбора того или иного метода нераз- рушающего контроля и технической диагно- стики (далее НК и ТД) необходимо провести сравнительный анализ эффективности наи- более распространенных методов диагно- стики применительно к задаче обеспечения надежности и безопасности энергетического оборудования. Для решения указанной за- дачи воспользуемся наиболее признанными в данное время в теории принятия решений методом анализа иерархий (МАИ).

В соответствие с методом МАИ нам не- обходимо выбрать наиболее эффективный метод технической диагностики для опреде- ления технического состояния энергетиче- ского оборудования.

Низший уровень иерархии составляют альтернативы A1, A2, ..., An. В качестве аль- тернатив применим для расчетов три метода технической диагностики. Для диагностики энергетического оборудования наиболее це- лесообразно применять вибродиагностику (Вд), тепловизионную диагностику (Т) или де- фектоскопию (Д).

В качестве критериев возьмем основные преимущества методов технической диа- гностики и выберем из общего списка три ►



Рис. 1. Классификация видов неразрушающего контроля

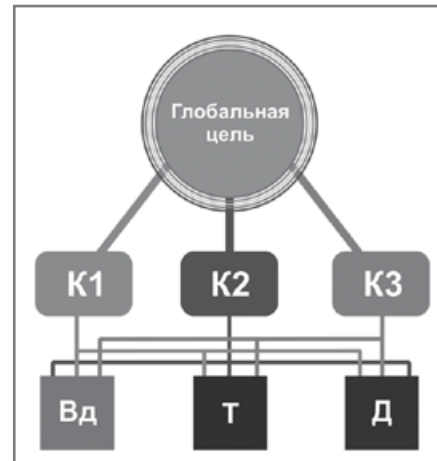


Рис. 2. Выбор метода технической диагностики

наиболее важных для расчетов методом МАИ. В качестве критериев могут быть:

- безопасность измерений (дистанционно или контактно);
- быстрота или скорость измерения (количество измерений за единицу времени);
- простота измерений (понятность и наглядность для любого диагноста);
- эффективность (количество диагностируемых дефектов и узлов данным методом);
- экономичность (стоимость применяемого метода);
- экологичность (использование для измерений дополнительных утилизируемых материалов и компонентов) и пр.

Для расчетов примем, что критериями будут: К1 – экономичность, К2 – безопасность, К3 – экологичность

Эти критерии будут являться целями для выбора одного из методов и составлять 2-ой уровень иерархии. Общая глобальная цель – определение самого экономичного, безопасного и экологичного метода технической диагностики (ТД) для определения технического состояния энергетического оборудования – первый уровень иерархии (рисунок 2).

Матрица парных сравнений (МПС) критериев 2-го уровня имеет вид:

ГЦ	К1	К2	К3
К1	1	4	3
К2	1/4	1	3/4
К3	1/3	4/3	1

$$\lambda_{\max} = 3,00$$

Экономичность имеет больше преимуществ по сравнению безопасностью (4) и меньше по сравнению с экологичностью (3). Числа во 2-ой и 3-ей строках матрицы выбраны так, чтобы полученная матрица была обратнo-симметричной и согласованной.

Вектор-столбец приоритетов, вычисленный приближенным способом, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 0,632 \\ 0,158 \\ 0,210 \end{pmatrix} = w$$

Следовательно, по отношению к высшей цели, экономичность имеет приоритет 0,632, безопасность – 0,158, а экологичность – 0,210.

Выполним теперь оценку альтернатив (3-й уровень) с точки зрения преимуществ каждого метода технической диагностики Т, Д, Вд. Для полной диагностики узлов энергетического оборудования необходимо выбрать метод ТД, который позволяет по

всем альтернативам сделать диагностику электромеханических устройств.

Соответствующие МПС имеют следующий вид:

К1	Т	Вд	Д
Т	1	1	3
Вд	1	1	3
Д	1/3	1/3	1

$$\begin{pmatrix} 0,426 \\ 0,426 \\ 0,149 \end{pmatrix} = w \quad \lambda_{\max} = 3,00$$

К2	Т	Вд	Д
Т	1	3	6
Вд	1/3	1	2
Д	1/6	1/2	1

$$\begin{pmatrix} 0,666 \\ 0,222 \\ 0,111 \end{pmatrix} = w \quad \lambda_{\max} = 3,01$$

К3	Т	Вд	Д
Т	1	4	2
Вд	1/4	1	1/2
Д	1/2	2	1

$$\begin{pmatrix} 0,571 \\ 0,143 \\ 0,286 \end{pmatrix} = w \quad \lambda_{\max} = 3,01$$

Объединим полученные вектор-столбцы в виде матрицы приоритетов П

$$P = \begin{pmatrix} 0,426 & 0,666 & 0,571 \\ 0,426 & 0,222 & 0,143 \\ 0,149 & 0,111 & 0,286 \end{pmatrix}$$

Умножая матрицу П на вектор-столбец w, получим искомым вектор-столбец приоритетов нижнего уровня иерархии: экономичность, безопасность и экологичность;

$$P \times \begin{pmatrix} 0,632 \\ 0,158 \\ 0,210 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,494 \\ 0,334 \\ 0,171 \end{pmatrix}$$

В соответствие с вычислениями по приоритетности выбираемого метода: термография – 49%, вибродиагностика – 33% и дефектоскопия – 17%.

В связи с необходимостью диагностики большого количества видов дефектов, имеющих различную физическую природу образования, наиболее эффективным методом технической диагностики для определения технического состояния энергетического оборудования является термография с детальным анализом тепловграмм объектов.

На наш взгляд самым эффективным и простым является метод тепловизионной диагностики (термография) с помощью тепловизоров серии BALTECH TR-01400 (рисунок 4) и программного обеспечения «Протон-Эксперт», разработанного специалистами компании BALTECH. Используя методики интервального оценивания  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$ , дисперсионного и дискриминантного анализа, а также применяя нелинейное преобразование тепловграмм с целью повышения контраста нашими специалистами разработаны мероприятия по повышению надежности энергооборудования:

- методы и методики тепловизионной диагностики электромеханических систем по тепловому полю объекта;
- разработана классификация видов дефектов энергомеханического оборудования по степени их развития и разбиение по критичности;
- с помощью математических моделей выработаны рекомендации по фактическому подходу к обслуживанию и диагностике энергетического оборудования.

Мы с удовольствием приглашаем всех технических специалистов энергетической отрасли России и стран СНГ для обсуждения вопросов, связанных с повышением надежности энергооборудования. ■

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев Д.А. Современные формы технического обслуживания. – СПб: БТЛ, 2007. -106 с.
2. Романов Р.А., Севастьянов В.В. Концепция «Надежное оборудование»: Методическое пособие, – СПб: Балтех, 2008. - 54 с.
3. Белоусов А.А. Диагностика механических систем аудиовизуальной техники. – СПб: Политехника, 2002. – 152 с.
4. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Москва, ЛКИ, 2001 г., 357 с.

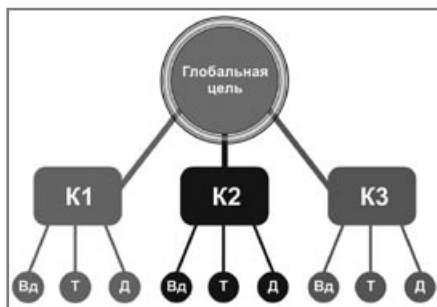


Рис. 3. Схема критериев методов технической диагностики

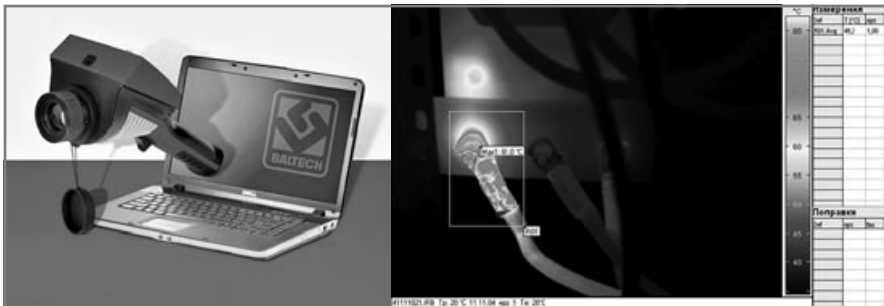


Рис. 4 Тепловизор BALTECH TR-01400 и обработанная на ПК термограмма