

СПОСОБ ЧИСЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ КОНТРАСТНЫХ ТЕРМОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ

Запропонований спосіб чисельної обробки тепловізійних зображень (термограм) методом “локального згладжування” хибних термоаномалій для ідентифікації дефектів зі слабо вираженими температурними полями при тепловізійному контролі і діагностиці стану устаткування і споруд

Ключові слова: термографія дефектів, тепловізор, “локальне згладжування” сигналу

Представлен способ численной обработки тепловизионных изображений (термограмм) методом “локального сглаживания” ложных термоаномалий для идентификации дефектов со слабо выраженными температурными полями при тепловизионном контроле и диагностике состояния оборудования и сооружений

Ключевые слова: термография дефектов, тепловизор, “локальное сглаживание” сигнала

The method of numeral treatment of thermovisions pictures (thermogramme) is presented, for the selection of weak signals, by the method of the “local smoothing” out with the purpose of determination of scopes and authentication of defects, at the use of termovisions in diagnostics and control of equipment of objects

Keywords: thermography of defects, termovision, “local smoothing” signal

Н.И. Базалеев
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

Б.Б. Бандурян
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

В.Ф. Клепиков
Член корреспондент НАН Украины, доктор физико-математических наук, профессор*

В.В. Литвиненко
Доктор технических наук, старший научный сотрудник*

Е.М. Прохоренко
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*

Контактный тел.: (057) 76-44-295, 067-994-95-87
E-mail: fort-58@mail.ru

В.С. Рихвицкий
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник**

В.Н. Робук
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник**

**Объединенный институт ядерных исследований
ул. Жулио Кьюри, 6, г. Дубна, Россия

М.А. Сагайдачный
Младший научный сотрудник*

*Институт электрофизики и радиационных технологий
НАН Украины
ул. Гуданова, 13, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (057) 700-41-11

Введение

Высокая производительность и оперативность тепловизионного метода по сравнению с традиционными методами диагностики, возможность прогнозирования и выявления дефектов на ранней стадии их развития делает его незаменимым при обследовании большой группы технологического оборудования и сооружений. По видимому инфракрасному (ИК) изображению объекта с использованием компьютерной

обработки материалов съемки строятся и анализируются термограммы (карты распределения радиационной температуры), выявляются термоаномалии, соответствующие дефектообразующим зонам, производится обнаружение и классификация дефектов. Наличие дефекта при такой диагностике отображается величиной аномального изменения радиационной температуры и характерными особенностями ее проявления на поверхности излучения на фоне ложных температурных аномалий, величина кото-

рых может превосходить значения термоаномалий, обусловленных дефектами.

Принимая во внимание, что значительная часть оборудования и сооружений эксплуатируется в условиях, исключающих постоянное присутствие обслуживающего персонала, а также огромный массив тепловизионной информации, который подвергается анализу, актуальным является разработка стационарных автоматизированных тепловизионных систем контроля, оснащенных программными средствами обработки термоизображений на основе формализованных принципов идентификации дефектов и выявления аварийных режимов работы оборудования.

Информативность термоизображений

Основу методики тепловизионного контроля и дефектоскопии оборудования и сооружений составляют технологии дистанционной ИК-радиометрии, которые базируются на регистрации потока ИК-излучения с поверхности объектов контроля и последующем анализе их термоизображений. Пространственно-временное распределение температуры на поверхности физических объектов отражает их структуру, является информационным полем, с помощью которого выявляются скрытые дефекты и дефектообразующие зоны, производится классификация дефектов.

Одним из основных критериев оценки и интерпретации поля ИК-излучения объекта является величина аномального изменения радиационной температуры ΔT_p в области дефекта, которая определяется исходя из данных моделирования и аналитических расчетов теплофизических параметров обследуемого объекта.

Поток собственного излучения W_c (Вт) любого тела с температурой T и степенью черноты (коэффициентом излучения) ϵ определяется формулой Стефана-Больцмана: $W_c = \epsilon \sigma T^4$, где σ - постоянная Стефана-Больцмана. Термоизображения отображают распределение радиационной температуры (т.к. $T_p \sim W_c$) на поверхности излучения объекта контроля, которые зависят как от истинной температуры T поверхности излучения, так и степени ее черноты ϵ . Основными факторами, влияющими на интенсивность ИК-излучения поверхности тел, являются: состояние поверхности излучения, солнечная радиация, климатические и техногенные факторы. В реальных условиях величина коэффициента излучения ϵ может изменяться в пределах (0,1 - 0,98). Состояние поверхности материала сильно влияет на радиационные свойства. Тела с малой поглощающей способностью имеют малую излучательную способность и наоборот. Масляные загрязнения, пыль, лакокрасочное покрытие увеличивают степень черноты поверхности металлов, создают ложные термоаномалии [1].

Солнечная радиация, сторонние (техногенные) источники теплового излучения могут нагревать контролируемый объект, а при наличии участков (узлов) с высокой отражательной способностью создавать впечатление о наличии высоких температур в этих местах. На термограмме тепловое отражение проявляется в виде температурной аномалии, хотя на самом деле ее нет. Такие аномалии распознаются (учитываются при анализе) путем сравнения термоизображений обсле-

дуемых объектов, снятых под разными углами зрения тепловизора к поверхности объекта контроля. При этом, местоположения термоаномалий, обусловленных эффектом отражения, на термоизображениях не совпадают.

Распознавание зон дефектообразования, осуществляется на основе анализа и обработки по определенным алгоритмам термоизображений объектов контроля, которые являются функцией заведомо неизвестных коэффициента излучения ϵ и температуры T , элементов поверхности излучения. При анализе материалов тепловизионной съемки широко используются аналитические и численные решения уравнений теплопроводности, компьютерное моделирование физических процессов, связанных с образованием дефектов и их проявлением в поле радиационной температуры. На основе данных анализа устанавливается связь (корреляция) между дефектообразующей зоной и областью температурной аномалии на поверхности объекта контроля с учетом возмущающих факторов окружающей среды и техногенных факторов. Сравнение реальных температурных полей, полученных на основе данных тепловизионной съемки объектов контроля, с расчетными полями проявления возможных дефектов позволяет сделать заключение о наличии дефекта или нарушении нормального режима функционирования оборудования.

Граничные условия и интервалы вероятных значений температуры, при которых на внешней поверхности объекта контроля отражается скрытый дефект, зависят от физического состояния и теплофизических свойств материала поверхности излучения и среды, внутри которой формируются и возмущаются тепловые потоки. Нижняя граница температуры определяется исходя из фоновой флуктуации радиационной температуры, обусловленной действием сторонних источников тепла и флуктуациями коэффициента излучения и поглощения поверхности. Верхняя граница вероятных значений температуры определяется исходя из данных моделирования и экспериментальных данных измерения критических значений температуры, возникающих в зоне образования дефекта.

Флуктуация радиационной температуры поверхности излучения и величина амплитуды ложных температурных аномалий ($T_{Ф,л}$) во многих случаях может значительно превышать температурные аномалии ($T_{Д}$), которые обусловлены внутренними дефектами. Соответствующее таким ситуациям термоизображение характеризуется высокой "контрастностью" (т.е. $T_{Ф,л}/T_{Д \square 1}$), что значительно затрудняет анализ тонкой структуры (теплогового портрета) термоаномалий, обусловленных внутренними дефектами, произвести их идентификацию. Одним из путей повышения эффективности идентификации является предварительная фильтрация термоизображений от ложных термоаномалий на основе сравнения градиентов температуры. Ложные термоаномалии, обусловленные флуктуацией коэффициента излучения или отраженного излучения, характеризуются высокими значениями градиента температуры их термопрофилей, что может быть использовано для фильтрации термоизображений от ложных термоаномалий, уменьшения "контрастности" термоизображений, повышения информативности полей ИК-излучения объектов контроля.

Постановка эксперимента

Возможности численного машинного анализа термоизображений были апробированы на экспериментальных образцах, изготовленных из листовой конструкционной стали, при моделировании различного рода скрытых дефектов и изучении особенностей их проявления в поле ИК-излучения. Важным этапом этих исследований являлось изучение принципов фильтрации ложных термоаномалий, возможности выделения на их фоне слабовыраженных температурных аномалий, обусловленных внутренними дефектами. Распознавание таких дефектов основано на выявлении особенностей распределения температурного поля на поверхности объекта контроля в зоне дефектообразования и его соответствия расчетным моделям ("тепловым образам"), характерным для каждого типа дефектов.

Экспериментальные исследования проводились на специализированном стенде, который позволял имитировать различные виды теплового воздействия на объект контроля и производить съемку термоизображений.

Тепловая активация образцов (формирование направленных тепловых потоков от внутренней к внешней поверхности излучения) осуществлялась с помощью источника ИК-излучения, выполненного в виде широкоформатного плоского излучателя с характеристиками, близкими к абсолютно черному телу (АЧТ). При этом, для упрощения теплофизических расчетов соотношение размеров излучателя и объектов исследования выбирались из условия использования его как бесконечного плоского нагревателя. В качестве измерителя поля ИК-излучения объектов контроля использовался тепловизор LIPS 814 на основе неохлаждаемой болометрической матрицы (320×240) элементов.

Основные технические характеристики тепловизора LIPS 814:

- спектральный диапазон 7.5 - 14 мкм;
- температурная чувствительность (при 30°C) 0.08°C;
- пространственное разрешение 1,3 мрад;
- поле зрения составляет 23° × 17°;
- диапазон измеряемых температур от - 20°C до +1500°C (опционно).

На рис.1. в качестве примера [2] представлены результаты экспериментальных исследований стальной пластины (Сталь 35) толщиной 2 мм с дефектами (пятна ржавчины) на наружной поверхности и скрытыми дефектами (продольные и поперечные пазы глубиной 1 мм и шириной 3-4 мм) с внутренней стороны:

а) термограмма образца в изотермическом режиме - характеризует состояние поля ИК-излучения на момент начала нагревания;

б) термограмма образца после 3 минут нагревания;

в) результат идентификации дефектов на основе компьютерной обработки тепловизионных изображений.

Как следует из рис. 1б, при малых значениях амплитуды ложных термоаномалий, обусловленных флуктуацией коэффициента излучения (вызываются наличием пятен ржавчины на поверхности излучения), термоаномалии, обусловленные внутренними

дефектами, проявляются и идентифицируются достаточно устойчиво. Сложности идентификации термоаномалий возникают в тех случаях, когда на термоизображении имеются ложные термоаномалии большой интенсивности, на фоне которых чрезвычайно трудно идентифицировать слабовыраженные термоаномалии, обусловленные дефектами.

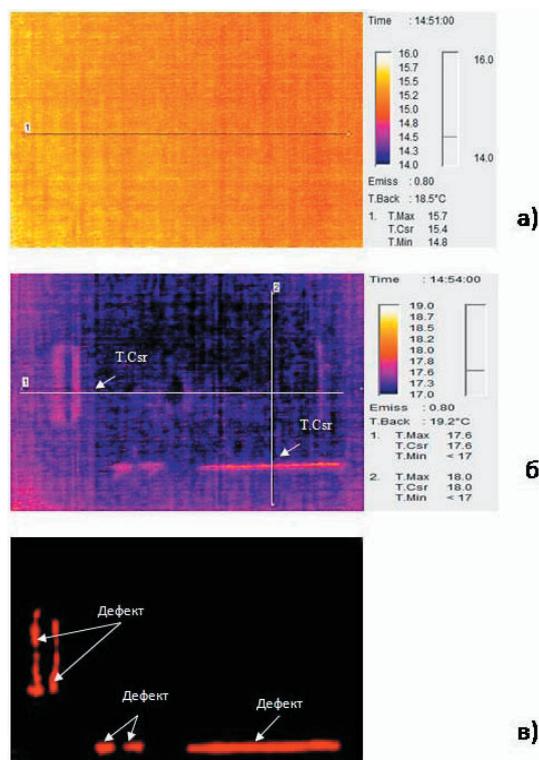


Рис. 1. Проявления дефектов на термоизображении при тепловой активации

На рис. 2 показан экспериментальный образец, на котором смоделированы различные виды дефектов, которые исследовались на предмет особенностей их проявления в поле ИК-излучения при тепловой активации образца:

а) полости цилиндрической формы (моделируют дефекты типа внутренняя каверна или полость): диаметр, глубина 0.5мм - 2мм. На рисунке полости отмечены темными кружками, индекс (1);

б) сквозные цилиндрические отверстия (моделируют ложные температурные аномалии): диаметр 1,5мм - 12мм. На рисунке отверстия отмечены в виде светлых кружков, индекс (2);

в) металлические заглушки, запрессованные в цилиндрические отверстия диаметром 5 - 10 мм (моделируют дефекты типа инородное металлическое включение). На рисунке заглушки отмечены в виде перечеркнутых кружков, индексы (3 - 10).

г) зона локального изменения коэффициента излучения (моделирует флуктуацию коэффициента излучения ϵ в зависимости от чистоты поверхности излучения). Участок поверхности образца, выделенный волнистыми линиями, был подвержен предварительной обработке - шлифовке. Остальная поверхность образца предварительной обработке не подвергалась.

Образец (Сталь 35) имеет форму пластины с размерами 300мм × 200мм, толщиной 2.5мм. Геометрические размеры образца согласованы с размерами ИК-излучателя, обеспечивающего его тепловую активацию. Схема расположения дефектов приведена на рис. 2.

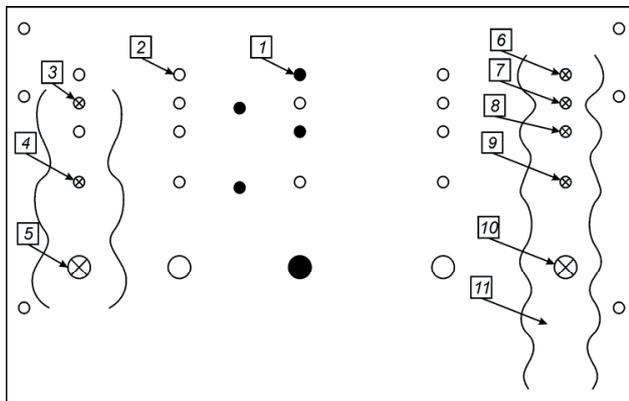


Рис. 2. Схема расположения дефектов на образце:
1 - цилиндрические полости (с внутренней стороны);
2 - сквозные отверстия. Заглушки: 3 - безкислородная медь; 4 - латунь; 5 - медь; 6 - сталь конструкционная; 7 - алюминиевый сплав; 8 - латунь; 9 - конструкционная сталь; 10 - нержавеющая сталь. Волнистыми линиями обозначены контуры зоны локального изменения коэффициента излучения ϵ

Тепловая активация в экспериментах производилась путем воздействия на внутреннюю поверхность образца однородного поля ИК-излучения, который создавал температурный напор и соответственно направленный тепловой поток между внутренней и внешней поверхностью образца. Наличие искусственно созданных дефектов, которые нарушают однородность теплофизической структуры материала образца, в конечном итоге отражается на его термоизображении и проявляется в виде характерных для каждого из вида дефектов идентификационных характеристик соответствующих термоаномалий.

Вне зависимости от физических причин проявления на термоизображении тех или иных термоаномалий, автоматизированная обработка материалов тепловизионной съемки начинается, как правило, с фильтрации ложных термоаномалий, выделения высокоинтенсивных термоаномалий, уменьшения их амплитуды, фиксации местоположения. Проведение таких операций позволяет уменьшить контрастность изображения и повысить температурное разрешение при выполнении вычислительных операций, связанных с анализом структуры термоаномалий, обусловленных дефектами. При анализе результатов эксперимента на этапах фильтрации ложных термоаномалий и их идентификации целесообразно использовались "опорные" термоизображения, снятые в режиме термодинамического равновесия образца с окружающей средой (источник тепловой активации экранирован). В условиях установившегося изотермического режима отсутствует температурный напор между внутренней и внешней поверхностью образца, а распределение радиационной температуры на термоизображении обусловлено изменением (флуктуациями) коэффициента излучения ϵ на неоднородностях его поверхности. Это

позволяет выделить на термоизображениях, снятых в режиме тепловой активации образцов, термоаномалии, которые обусловлены неоднородностями их поверхности излучения.

Обработка результатов

На рис. 3 представлена термограмма экспериментального образца в режиме тепловой активации ИК-излучателем в течение 3 мин.

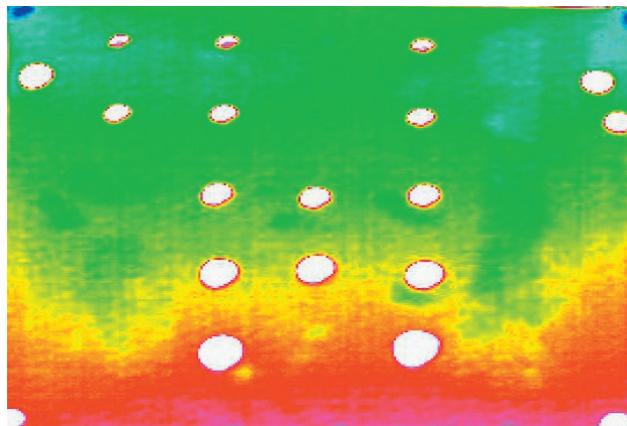


Рис. 3. Термограмма образца пластины

Термограмма характеризуется высокой контрастностью из-за высокого значения амплитуды термоаномалий в области сквозных отверстий (результат прямого прохождения через отверстия ИК-излучения нагревателя). На фоне высококонтрастного термоизображения, не представляется возможным выделить слабые изменения температурного поля (на уровне пороговой чувствительности тепловизора), вызванные смоделированными дефектами.

Общий принцип математической обработки высококонтрастных термоизображений, который использовался нами для выделения слабовыраженных термоаномалий, обусловленных дефектами, заключался в сглаживании (усреднении) пикового значения аномалии в пределах области (зоны) их проявления, снижения амплитуды аномалии до уровня фона, выделения (оконтуривание) области проявления аномалии. Посредством данной операции убиралась «засветка» термоизображения аномалиями высокой интенсивности, оптимизировался динамический диапазон верхней и нижней границ анализируемых температур термоизображения, что позволяло производить анализ особенностей термопроявления дефектов на уровне максимального температурного разрешения тепловизионной аппаратуры.

При математической обработке термоизображения тепловизионных снимков представлялись в виде цифровой матрицы 320x240 (формат CSV), соответствующей пиксельному распределению температуры на микролометрической матрице тепловизора, и обрабатывались в программном пакете Maple.

В качестве примера на рис. 4 представлен результат цифрового преобразования термоизображения, рис. 3, демонстрирующий этап фильтрации термоаномалий высокой интенсивности.

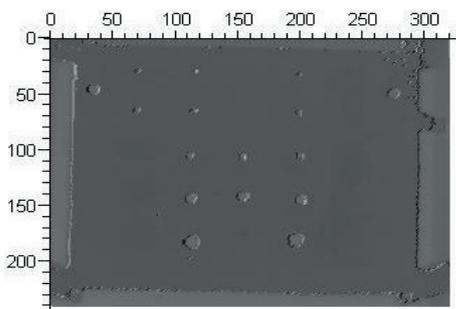


Рис. 4. Выделение зон термоаномалий высокой интенсивности

На цифровом изображении, четко выделяются области расположения наиболее интенсивных термоаномалий анализируемого термоизображения, в пределах которых производится уменьшение их амплитуды до уровня температур, характеризующих термоявление дефектов.

Простейшим методом пиксельного анализа общего назначения является локальное сглаживание графика (значений) интенсивностей - т.е. замена величины интенсивности $A_{i,j}$ в каждой точке средним значением $A_{i,j}^1$ по малой окрестности радиуса r согласно формулы [3]:

$$A_{i,j}^1 = \frac{1}{S} \sum_{k,l} A_{i-k,j-l} \theta(r^2 - k^2 - l^2), \quad S = \sum_{k,l} \theta(r^2 - k^2 - l^2) \quad (1)$$

Здесь и далее удобно использовать функцию Хевисайда [4]:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Локальное сглаживание “убивает” высокочастотные (пиксельные) шумы. Развивая этот прием, вычислим разность локальных сглаживаний при двух различных величинах окрестностей:

$$A_{i,j}^2 = \frac{1}{S_2} \sum_{k,l} A_{i-k,j-l} \theta(r_2^2 - k^2 - l^2) - \frac{1}{S_1} \sum_{k,l} A_{i-k,j-l} \theta(r_1^2 - k^2 - l^2)$$

$$S_m = \sum_{k,l} \theta(r_m^2 - k^2 - l^2) \quad (2)$$

Применяя данную процедуру (т.е., вычисление “локальной кривизны” рельефа графика интенсивностей) ко всей поверхности объекта исследования, получим сглаженную картину изменения температурного поля в целом, рис. 5.

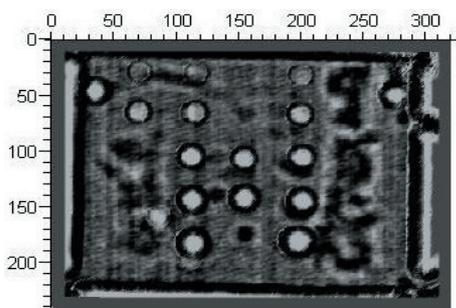


Рис. 5. Численный образ термоизображения после процедуры локального сглаживания методом “локальной кривизны”

Такое преобразование линейно и обращает в ноль постоянную составляющую.

Следовательно, линии перехода через ноль являются границами областей “локально постоянной кривизны”.

Мы их можем отождествить с неоднородностями теплового поля на поверхности обследуемого объекта.

Вычисленные “нулевые линии” изображены на рис. 6.

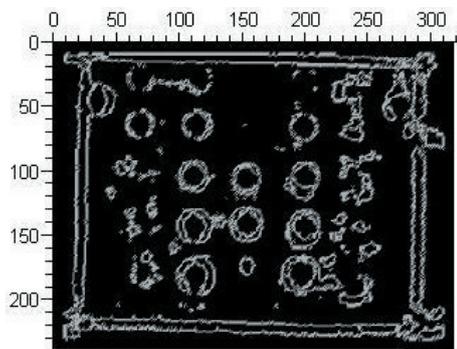


Рис. 6. “Нулевые линии” контуров неоднородностей

Сравнивая местоположение известных нарушений, рис. 2, с контурами “нулевых линий”, рис. 6, видим высокое совпадение в области особых зон - зонах размещения дефектов.

Особые зоны, выявленные при помощи тепловизионной съемки, соответствуют дефектам как внутри, так и на поверхности исследуемого образца.

Следует отметить, что используя данный метод вычислений, мы переходим от анализа абсолютных значений температуры к анализу их градиентов и контуров “нулевых линий”, границ расположения температурных аномалий (неоднородностей), учитывая их структурные особенности.

Рассмотренная методика преобразования термограмм позволяет повысить эффективность выделения (локализации) дефектов со слабо выраженным термоявлением на высококонтрастных тепловизионных термоизображениях, является основой для численного моделирования реальных дефектов и разработки автоматизированных методов их идентификации в промышленных условиях.

Выводы

В работе предложена простейшая модель математического фильтра для локального сглаживания на термоизображениях высокоинтенсивных (ложных) аномалий и способ пиксельного анализа, позволяющих идентифицировать дефекты со слабо выраженным термоявлением.

Распознавание таких дефектов основано на выявлении особенностей распределения температурного поля на поверхности объекта контроля в зоне дефектообразования и его соответствия расчетным моделям “тепловых образов”, характерных для каждого вида дефектов.

Література

1. Базалеев, Н. И. Влияние излучательной способности на информативность поля инфракрасного излучения./ Н. И. Базалеев, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецкий, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко. //Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2008.– 5/4.– С.32–36.
2. Тепловізійний неруйнівний контроль і дефектоскопія на основі активної інфрачервоної радіометрії. М. І. Базалеев, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецкий, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Є. М. Прохоренко. /Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Збірник наукових статей за результатами в 2007-2009 рр. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. – Київ, 2009. – С.245-250.
3. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики./ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 735с.
4. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям./ Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана.пер.с англ. – М.: Мир, 1979. – 830с.

УДК 531.983

КРИТИЧНА КОНЦЕНТРАЦІЯ ТА ЇЇ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПЕРКОЛЯЦІЙНИХ ТЕНЗО- ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Ю. О. Кубрак

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра автомобілів і механіки технічних систем*
Контактний тел.: 067-476-96-83
E-mail: kubrak79@ukr.net

О. І. Грабар

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра економіки*
Контактний тел.: 067-766-23-10
E-mail: grabar-olga@rambler.ru

*Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

Встановлено, що залежність значення критичної концентрації від товщини шару чутливого елемента перколяційного тензоперетворювача лінійних деформацій при переході від одномірного до тривимірного простору забезпечує побудову математичної залежності критичної перколяції від кінцевих заданих геометричних розмірів
Ключові слова: перколяційний тензоперетворювач, критична концентрація

Установлено, что зависимость значения критической концентрации от толщины шара чувствительного элемента перколяционного тензопреобразователя линейных деформаций при переходе от одномерного до трехмерного пространства обеспечивает построение математической зависимости критической перколяции от конечных заданных геометрических размеров
Ключевые слова: перколяционный тензопреобразователь, критическая концентрация

Determined, that dependence of critical concentration value from the sensitive element's thickness of percolation strain gauge of linear deformation on transition from one-dimensional to tridimensional space provides mathematical model construction of critical concentration from the given geometry
Key words: percolation strain gauge, critical concentration

1. Вступ

Наразі в різних областях науки і техніки залишається необхідність отримання високоточних резуль-

татів вимірювань лінійних деформацій. Теоретичні та експериментальні дослідження [1–4], а також надзвичайна перспективність застосування перколяційних систем в високих технологіях дає можливість ство-