

тільки завдяки методам математичного моделювання. У статті приведені рішення двох крайових задач нелінійного тепло переносу у слоїстих системах.

**Ключові слова:** математичне моделювання, нелінійний тепло переніс, шарувато-неоднорідні системи, високотемпературні пожежні режими, теплофізично неоднорідні двох- та трьохшарові системи.

**Mathematical modeling of nonlinear heat transfer in layered systems/ A. P. Slesarenko, I. R. Vengerov //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New desicions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014.-№ 7 (1050).- P.196-201. Bibliogr.:2. ISSN 2079-5459**

The mathematical models of high-temperature (fire) regimes layered systems of underground structures . In underground areas as mining destination, and in the transport, storage and other common concrete and other lining, ties and more. Their thermal parameters may differ materially from those in rock masses. When fires occur underground critical temperature field and thermoelastic stress, which can only be forecast using mathematical modeling . The paper presents two solutions of boundary value problems of nonlinear heat transfer in layered systems.

**Keywords:** mathematical modeling, nonlinear heat transfer, layered system, high fire regimes, thermal inhomogeneous two-and three-layer system.

**УДК 621.039.83**

**Н. И. БАЗАЛЕЕВ**, канд. техн. наук, в.н.с., ИЭРТ НАН Украины, Харьков

**В. В. БРЮХОВЕЦКИЙ**, д-р физ.-мат. наук, зам.директора, ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

**В. Ф. КЛЕПИКОВ**, д-р физ.-мат. наук, проф., член-корресподент НАН Украины, директор, ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

**В. В. ЛИТВИНЕНКО**, д-р техн. наук, зам.директора, ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

**Е. М. ПРОХОРЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., ИЭРТ НАН Украины, Харьков

## **ТЕРМОГРАФИЯ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ УПРУГИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**

Предложен и апробирован метод тепловизионной термографии дефектных структур в металлах и сплавах на основе циклической активации упругими напряжениями объекта контроля и регистрации термоаномалий, обусловленных структурными неоднородностями. Выявлена значительная чувствительность метода к проявлению нелинейности параметра теплопроводности из-за наличия микродефектов в образце.

**Ключевые слова:** термографический метод дефектоскопии, термопроявление дефектных структур.

**Введение.** Многочисленные исследования прочностных характеристик конструкционных материалов подтверждают наличие сложного сочетания и соотношения дефектных структур различных уровней, определяющих их свойства. Обнаружение в конструкционных материалах процессов старения и дефектов различной природы является одной из наиболее актуальных задач неразрушающего контроля при мониторинге состояния изделий в процессе их эксплуатации.

Существующие методы неразрушающего контроля состояния элементов конструкций основаны на взаимодействии физических полей (акустических, магнитных, рентгеновских, тепловых и пр.) с веществом, в результате которого происходит изменение контролируемых параметров поля в зависимости от состояния вещества объекта контроля. При этом, во многих случаях объект контроля, помимо воздействия рабочего (информативного) физического поля, подвержен влиянию неконтролируемых физических полей,

© Н. И. БАЗАЛЕЕВ, В. В. БРЮХОВЕЦКИЙ, В. Ф. КЛЕПИКОВ, В. В. ЛИТВИНЕНКО, Е. М. ПРОХОРЕНКО, 2014

порождающих различные внутренние эффекты, влияющие на информативность контролируемых параметров (признаков), на основании которых определяются состояние материалов, наличие дефектов.

В настоящее время интенсивно развиваются методы термографического контроля, основанные на регистрации изменения температурного поля в области дефектной структуры (дефекта), обусловленного интенсивной трансформацией энергии упругих волн механического напряжения в тепловую энергию [1-3]. При тепловом неразрушающем контроле дефекты в материалах проявляются в виде аномальных зон (областей) нарушения теплофизических характеристик и физических признаков, параметры которых отличаются от нормативных, характерных для материалов, не имеющих дефектов. Тепловыделение в дефектной зоне можно инициировать путем воздействия на контролируемый материал активирующим физическим полем, например, акустическим [4-6] или приложением циклических напряжений. В этом случае информативные параметры температурного поля (амплитуда, градиент температуры, пространственные характеристики распределения термоаномалий) отражают особенности внутреннего строения вещества, в частности, наличие структурных неоднородностей и дефектов с повышенным рассеянием энергии упругих волн в тепло. Это позволяет обнаруживать трещины, пористость, инородные включения материалов, изменение структуры и физико-химических свойств по изменению теплопроводности, теплоемкости, коэффициента теплоотдачи.

Особенностью активации твердых тел циклическими напряжениями является возможность выборочного нагрева дефектной зоны. Упругие волны в твердых телах чувствительны ко всем структурным неоднородностям и границам раздела сред, изменению теплофизических параметров среды. Поглощение упругих волн в таких средах приводит к температурной модуляции неоднородностей, изменению градиента температуры на границе дефектной зоны, что проявляется на внешней поверхности в виде температурных аномалий, которые коррелируют с неоднородностями и скрытыми дефектами среды. Деформация, которая возникает в металле в результате приложенного напряжения, сопровождается, как правило, изменением температуры образца, вызванной эффектом термоупругости.

На основе анализа тепловой модели осуществляется оценка температурного перепада между зоной расположения трещины и неповрежденной частью образца при заданной величине циклической нагрузки [7,8]. При достаточно продолжительном времени действия циклического напряжения, испытываемый образец проходит определенные стадии термодинамического (теплого) равновесия образца, включая неизотермический режим, при котором на поверхности образца возникают аномалии температурного поля в зонах необратимого преобразования (рассеяния) механической энергии в теплоту - структурных неоднородностях материала за счет внутреннего трения. Проявление усталостных дефектов (развитие трещин, структурные изменения) во многом зависят от соотношения упругой и пластической составляющих деформационного процесса и предыстории действовавших напряжений и процессов старения. Для металлов, имеющих высокую теплопроводность, время проявления неизотермического режима ограничивается значениями теплофизических параметров и конструктивными особенностями (толщина, ширина, форма профиля сечения) испытываемых образцов. Расчеты показывают, что при температурном разрешении термоизображений около 0,01-0,02 К возможно выявление трещин в начальной стадии развития, причем, чувствительность теплового метода превышает чувствительность магнитных методов

Реальные твердые тела являются микронеоднородными. Кристаллиты в поликристаллическом теле ориентированы хаотически друг относительно друга, при этом на границах зерен при действии периодических механических напряжений происходит как час-

тичное отражение и преломление, так и трансформация, поглощение и рассеяние энергии упругих волн. Рассеяние энергии упругих волн в металлах связано с внутренним трением, причиной которого являются дислокации и другие источники трения, не связанные с дислокациями. Наличие внутреннего трения в металлах приводит к уменьшению значений модуля упругости, определенных для бездефектных материалов, так как общая деформация в любой момент состоит из суммы упругой и пластической деформаций. За счет эффекта термоупругости циклическая деформация в металле сопровождается равномерным изменением температуры во всех точках образца, если он гомогенен (т.е. гомогенны структура и напряжения в образце), а установившееся термодинамическое состояние такого образца характеризуется изотермическим режимом. Наличие структурных неоднородностей в образце, имеющих разные значения внутреннего трения, вызывает неравномерное распределение напряжений, температурных градиентов и тепловых потоков за счет необратимого рассеяния механической энергии в тепло на этих неоднородностях. В этом случае термодинамическое состояние образца характеризуется неизотермическим режимом, параметры которого зависят от теплофизических характеристик металла, времени съемки термоизображения образца в процессе действия циклического напряжения, параметров теплоотдачи (теплопроводность, радиация, конвективный теплообмен и пр.)

Различные физико-механические процессы, происходящие в материале образца под действием внешних и внутренних сил, могут менять в отдельных зонах структуру материала и значение модуля упругости, создавать зоны разрушения по границам зерен, содержащих большое количество дефектов (различно ориентированных зерен, вакансий, дислокаций, микропор, трещин). Поэтому, при приложении к образцу циклической нагрузки в указанных зонах будет наблюдаться температурная аномалия, свидетельствующая о наличии в образце структурной неоднородности.

**Целью работы.** Целью работы является экспериментальное изучение, посредством метода тепловизионной термографии, особенности термопроявления дефектных структур при циклических нагрузках.

**Методика экспериментов.** Принимая во внимание изложенные выше материалы, проведены экспериментальные исследования по изучению особенностей термопроявления дефектных структур в металлах при циклических напряжениях. Термографические изображения объектов контроля получены с помощью тепловизионной системы LIPS 814 (температурное разрешение 0,08 К, спектральный диапазон инфракрасного излучения 8-14 мкм) и фотопирометра Fluke 576. Металлографические исследования структуры образцов проведены по стандартным методикам количественной металлографии [9] с использованием оптических микроскопов МИМ-10 и МБС-9. В качестве источника циклических напряжений использовался генератор УЗДН-22 (частота 22 и 44 кГц, мощность от 0,1 до 1,0 кВт). Объектом исследования являлись образцы из конструкционной стали и сплавов алюминия, изготовленные в виде прямоугольных пластин толщиной (2,0–5,0) мм и размерами от (30×150) мм<sup>2</sup> до (160×230) мм<sup>2</sup>

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 представлены принципиальная схема и динамика изменения температур. На рис. 1, а представлена схема нагружения экспериментального образца, которая реализовывалась на испытательном стенде. Уровень энергии упругих напряжений, прикладываемых к образцу, регулировался изменением прижимного усилия согласующего устройства между образцом и излучателем генератора. Выделение тепла  $Q_1$  и  $Q_2$  соответственно в точках  $K_1$  и  $K_2$  энергопоглощающих структур, образованных не идеальными контактами образцов с опорой и излучателем, учитывалось при исследовании термодинамического состояния образца и особенностей термопроявления смоделированных дефектов (выделение тепла  $Q_d$ ) при циклической нагрузке.

На рис. 1, б представлена динамика роста температуры стального образца по сечениям В, С, D, E, F при действии циклических (22 кГц) напряжений. Графики изменения температуры стального образца с дефектом D (сварной шов, имитирующий дефект типа «инородное включение – нарушение структуры материала») показаны сплошными линиями, пунктирными линиями показан ход графиков при отсутствии дефекта. Значительное отличие термодинамики образцов наблюдается на кривых в области времен максимального термопроявления дефектной структуры, которые являются оптимальными для термографической съемки образца (в нашем случае 80–100 секунд, когда амплитуда термоаномалии в области дефекта максимальна). С течением времени амплитуда термоаномалии сглаживается за счет механизмов теплопроводности и рассеивания тепла, а также увеличения мощности теплового потока со стороны контакта  $K_1$ , приводящего к снижению разрешающей способности термоизображений.

Наблюдаемый на графике рис. 1б подъем температуры в области максимального проявления термоаномалии является идентификационным признаком наличия в образце дефекта. Данные представленные на рис. 2, относятся, к образцам конструкционной стали (сталь 35), при отсутствии дефектов.

На рис. 2 представлены термоизображения и термограммы нагруженного образца из конструкционной стали (сталь 35) без дефектов. Неизотермический режим в течение всего времени действия циклической нагрузки характеризуется монотонностью термограмм на исследуемой части образцов. Общий подъем температуры образца со стороны действия напряжения нагрузки вызван тепловыделением в точке  $K_1$ .

Для образца из алюминия 6111 результаты представлены на рис. 3. Продольный разрез делит образец на две равные части: нижняя часть имеет жесткий контакт с упором (точка  $K_2$ ), верхняя часть не закреплена. Точка приложения циклических напряжений ( $K_1$ ) является общей. При отсутствии циклических напряжений образец находится практически в изотермическом состоянии (изменение радиационной температуры в основном определяется флуктуацией коэффициента излучения поверхности образца). При действии циклических (22 кГц) напряжений образец переходит в неизотермический режим, при этом на нижней части образца в области дефекта явно просматривается термоаномалия.

На рис.3 б показана термограмма проявления дефекта (максимум термопроявления - 36 секунда после включения циклической нагрузки) после проведения специальная

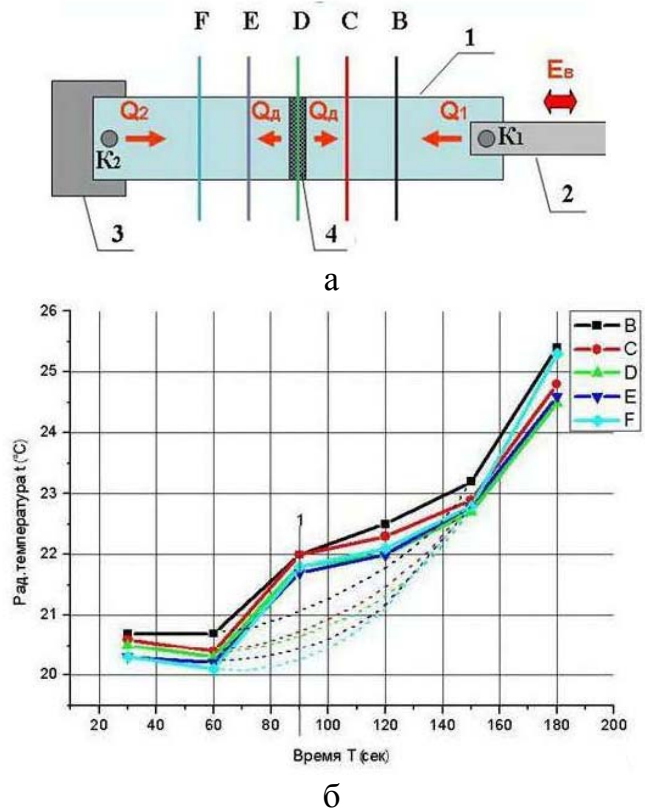


Рис. 1 – Схема нагружения образца (а) и динамика роста температуры стального образца по сечениям В, С, D, E, F при действии циклических напряжений (б).  $K_1$  – точка приложения циклических напряжений генератора;  $K_2$  - точка крепления образца к опоре. 1 - экспериментальный образец; 2 – источник циклических напряжений; 3 – согласующая опора устройства образца; 4 - зона расположения дефектной структуры

обработки исходной термограммы, учитывающей влияние источников тепла в точках  $K_1$  и  $K_2$ .

Амплитуда термоаномалии в зоне дефекта превышает фоновую температуру на  $0,8^\circ\text{C}$ . На верхней, ненагруженной части образца, величина термопроявления дефекта не превышает уровня флуктуаций фона. Следует отметить, что из-за эффекта сглаживания термоаномалий в металлах с высоким значением теплопроводности в условиях действия «посторонних» источников тепла из точек подачи циклических напряжений  $E_b$  генератора ( $K_1$ ) и крепления образца к опоре ( $K_2$ ), определить визуально (без предварительной обработки) термопроявление дефекта на тепловизионном снимке довольно сложно.

Проведенные исследования подтверждают возможность обнаружения скрытых дефектов и структурных неоднородностей по их термопроявлению в материалах, подвергнутых циклическим нагрузкам. Установлено, что дефекты микроструктуры материала при поглощении энергии упругих волн создавали «сглаженные» термоаномалии, превышающие фоновое значение температуры на  $0,3-0,8^\circ\text{C}$ .

Дефекты типа «инородное включение» (шлаки, трещина, свищ) характеризуются высокими значениями амплитуды термоаномалий, превышающих фоновую температуру на  $0,4^\circ\text{C}$  и более. В зависимости от теплофизических характеристик металла (теплоемкость, теплопроводность) время установления максимального значения

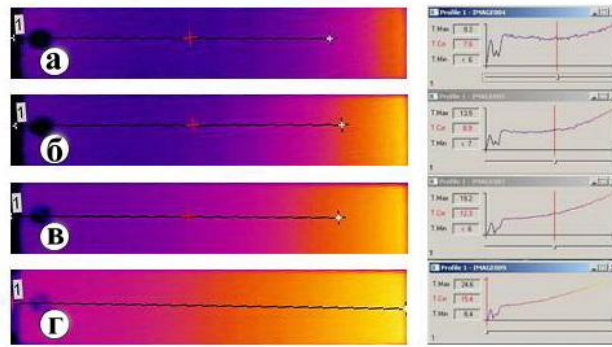


Рис. 2. – Термоизображения и термограммы нагруженного образца из конструкционной стали (сталь 35) без дефектов

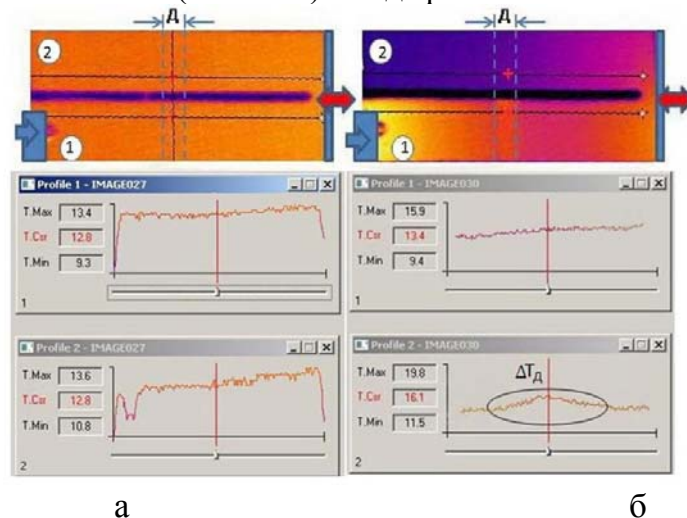


Рис. 3 – Термоизображение и термограммы: а – не нагруженного, б – нагруженного циклическим напряжением образца из алюминиевого сплава 6111, имеющего поперечный дефект типа «нарушение микроструктуры материала» (область Д)

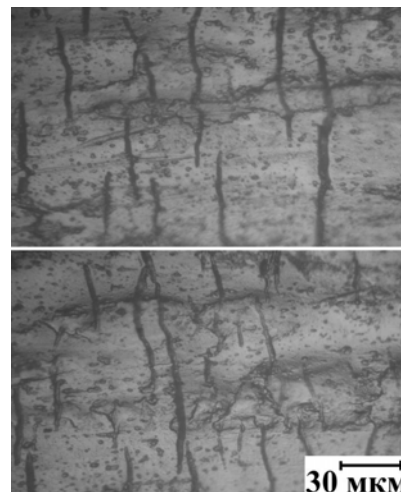


Рис. 4 – Вид микроструктуры образца промышленного алюминиевого сплава 6111 в дефектной зоне, сформированной методом «сгиб-разгиб»

термоаномалий при действии циклической нагрузки составляет, 10-60 сек

На рис. 4 приведены характерные виды полученной таким образом дефектной микроструктуры в зоне локализации деформации. Поверхность образца была предварительно сошлифована на  $\frac{1}{4}$  его толщины, а затем отполирована и подвергнута травлению универсальным травителем такого состава: 17 мл  $\text{HNO}_3$ , 5 мл  $\text{HF}$ , 78 мл  $\text{H}_2\text{O}$ . Как показали металлографические исследования, протяженность дефектной зоны составляет величину 300–500 мкм. Сами же микротрещины имеют ширину около 3-7 мкм, а длина их может достигать 200 мкм.

### Выводы

1. Результаты проведенных исследований являются основой для создания нового метода тепловизионного неразрушающего контроля на основе активации образцов волновыми механическими напряжениями и регистрации термоаномалий, обусловленных структурными неоднородностями образцов. Учитывая большое влияние на структурную нелинейность материалов твердых тел надмолекулярных внутренних структур (дислокаций, микротрещин, границ зерен, локальных внутренних напряжений и т.д.), метод может быть использован для дефектоскопии конструкционных материалов.

2. Выявлена значительная чувствительность метода к проявлению нелинейности параметра теплопроводности из-за наличия микродефектов в образце. Наличие дефектов в твердых телах значительно меняет их упругие свойства, что позволяет при волновой активации образцов на основе данных распределения температурных полей производить их идентификацию. При распространении упругих волн аномально высокое рассеяние энергии происходит на структурных неоднородностях и дефектах, имеющих повышенные характеристики поглощения упругих волн по сравнению с гомогенным (поликристаллическим) материалом.

3. Распределение температуры на поверхности объекта контроля связано с внутренними процессами тепловыделения через механизмы теплопередачи. Высокие значения теплопроводности металлов являются причиной значительного ослабления и сглаживания амплитуды термоаномалий, которые формируются внутренними источниками тепловыделения, находящимися на значительном расстоянии от поверхности контроля. При анализе причин ослабления термоаномалий необходимо учитывать конвективный поверхностный теплообмен и рассеяние энергии упругих волн в окружающую среду от взаимодействия упругой системы с этой средой.

**Список литературы:** 1. Nordal, P. E. Photothermal radiometry [Текст] / P.E. Nordal, S.O. Kanstad // Physica Scripta. – 1979. – № 20. – P. 659-662. 2. Henneke, E. G. Thermography. An NDI method for damage detection [Текст] / E.G. Henneke, K.L. Reifsnider, W.W. Stinchcomb // Journal of Metals. – 1979. – V.31. - P. 11-15 3. Riegart, F. Eddy-Current lock-in thermography: Method and its potential [Текст] / F. Riegart, Th. Zweschper, G. Busse. // J. phys. IV France. – 2005. - V.125. - P. 587-591. 4. Базалеев, Н. И. Тепловизионная акустотермографическая дефектоскопия конструкционных материалов [Текст] / Н.И. Базалеев, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко // ВАНТ. Серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение". – 2011 – № 2(72). – С.178-185. 5. Han, X. Thermosonics: Detecting cracks and adhesion defects using ultrasonic excitation and infrared imaging [Текст] / X. Han, L.D. Favro, Z. Ouyang, R.L. Thomas // The Journal of Adhesion. – 2001. - V.76(2). – P. 151-162. 6. Thomas, R. L. Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics. [Текст] / R. L. Thomas // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, Melville, NY, – 2002. – V615 – P. 3-13. 7. Dillenz, A. Ultrasound lock-in thermography: feasibilities and limitations. [Текст] / A. Dillenz, G. Busse, and D. Wu. // SPIE . – 1999. - Vol. 3827. - P. 10-15 8. Ранцевич, В.Б. Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость [Текст] / В. Б Ранцевич. // Дефектоскопия. – №5. – 1977. – с.102-108. 9. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография. [Текст] / С. А. Салтыков // М.: Металлургия, 1976. – 272С.

Поступила в редколлегию 20.01.2014

**Термография дефектных структур при циклической активации упругими напряжениями/ Базалеев Н. И., Брюховецкий В. В., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Прохоренко Е. М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. - № 7 (1050). – С.201-207. – Бібліогр.: 9 назв. ISSN 2079-5459**

Запропоновано та апробовано метод тепловізійної термографії дефектних структур в металах і сплавах на основі циклічної активації пружними напруженнями об'єкта контролю та реєстрації термоаномалій, зумовлених структурними неоднорідностями. Виявлено значну чутливість методу до проявлення нелінійності параметру теплопровідності через наявність мікродефектів у зразку.

**Ключові слова:** термографічний метод дефектоскопії, термопроявлення дефектних структур.

**Thermography of imperfect structures during the cyclic activating resilient tensions/ M. I. Bazaleev, V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, E.M.Prokhorenko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New desicions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014.-№ 7 (1050).- P.201-207. Bibliogr.:9. ISSN 2079-5459**

Proposed and tested method of thermal thermography defect structures in metals and alloys based on cyclic activation elastic stresses object monitoring and recording thermal anomaly caused by structural inhomogeneities. Revealed a significant sensitivity to the manifestation of the nonlinearity parameter of thermal conductivity due to the presence of micro-defects in the sample.

**Keywords:** thermographic inspection method, thermoexhibitings defect structures

## УДК 696.2

**И. И. МОСКВИНА**, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецк

### **ВЕРОЯТНОСТЬ ВЗРЫВОВ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГАЗИФИЦИРОВАННОЙ КВАРТИРЕ ИЗ-ЗА АВАРИЙ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ ПУНКТЕ**

Предложена методика оценки взрывобезопасности бытовых объектов вследствие аварий на газораспределительном пункте (ГРП), которая математически описывает зависимость вероятности загазованности помещения в течение года от параметров потока отказов регулятора давления, сбросного и запорного клапанов, установленных на газораспределительном пункте, и сроков их диагностики, что позволяет обосновать целесообразность установки электромагнитного клапана-отсекателя на вводе в газифицированное помещение. Приведены примеры расчетов.

**Ключевые слова:** взрыв, газ, случайное событие, отказ, вероятность.

**Введение.** Причиной загазирования газифицированных квартир может быть авария на газораспределительном пункте (ГРП), произошедшая в результате перехода газа из трубопровода среднего давления (0,005-0,3 МПа) в трубопровод низкого давления (до 5 кПа). Подобная авария может спровоцировать отрыв пламени от горелок газовых печей, установленных в квартирах, что вызывает загазирование помещения до взрывоопасной концентрации (5-15 %) и при случайном появлении источника поджигания возможен взрыв [1, 2].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** В Украине на обслуживании предприятий по газоснабжению и газификации находится свыше 17,5 тыс. ГРП, из которых более 50% отработали свой гарантийный срок эксплуатации [3].

**Цель и задачи исследования.** Определить, какова вероятность взрывов в течение года в газифицированной квартире украинцев из-за аварий на ГРП. Задачей исследования является раскрытие механизма влияния параметра потока отказов оборудования газо-