

УДК 530.17: 621.396.6

ПЛАТОНОВ В.В., КОВАЛЬЧУК А.В.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## КАТЕГОРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ТЕОРИИ ДИВЭ

Показано, що теорія дискретно-імпульсного введення енергії (ДИВЕ), початково розвинена для теплотехнологій, може бути успішно застосована для прогнозування надійності систем та при створенні апаратури для ІЧ-діагностики.

Показано, что теория дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ), первоначально развитая для теплотехнологий, может быть успешно применена для прогнозирования надежности систем и при создании аппаратуры для ИК-диагностики.

It is shown, that the theory of discretely-pulse input of energy (DPIE) originally advanced for thermal technologies, can be successfully applied for forecasting reliability of systems and at creation of the equipment for IR-diagnostics.

$a_0$  – коэффициент;  
 $c$  – скорость износа;  
 $g_i$  – обобщенная скорость;  
 $k_n$  – коэффициент нагрузки;  
 $t$  – время работы;  
 $t_{pec}$  – долговечность работы элемента;  
 $Q_i$  – обобщенная сила;  
 $\Delta S, \Delta S_{крит}, \Delta S_{изм}$  – соответственно величина дефекта, критическая и измеренная;

$Z$  – переходное сопротивление;  
 $\lambda$  – интенсивность отказов;  
 $\tau$  – постоянная времени;  
 $\Pi$  – потенциальная энергия;  
 $T$  – длительность работы;  
 $\Phi$  – диссипативная функция.

Теория дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) [1] определяет принципы взаимодействия организованной энергии с гетероструктурами для решения технологических и нанотехнологических задач, что обуславливает необходимость категориального анализа имеющихся наработок.

Проведенный категориальный анализ теории ДИВЭ показывает, что теория дискретно-импульсного ввода энергии способствует решению задач теории спектрального анализа, теории надежности и разработке средств измерительной техники контроля состава веществ. Теория ДИВЭ распространяется также на такие процессы, как дисперсное распространение энергии по технологическому пространству, локальный ввод энергии в систему, импульсное воздействие энергии во времени, наличие дискретной функции распределения упруго сжимаемого технологического объема и др. Одной из основных особенностей ДИВЭ является его осуществимость в многофазных, однофазных и трансформируемых в многофазные системах. При этом одна из исходных или имитируемых фаз должна быть суще-

ственно сжимаемой по сравнению с другими. Выполнение этого условия позволяет применить теорию ДИВЭ в реологии, теории динамических аналогий, физике отказов надежности, теории статистических измерений, теории копий.

Теория дискретно-импульсного ввода энергии является обоснованием процессов для вскипающих многофазных систем, а также описывает процессы взаимодействия энергии с неоднородными структурами при её дискретно-импульсном вводе.

С другой стороны, теоретические разработки методов контроля состава веществ (например, методы ИК-спектроскопии) могут быть существенно дополнены с целью расширения их функциональных возможностей с использованием положений теории дискретно-импульсного ввода энергии.

В статье рассмотрены общие подходы для решения проблем ряда областей техники и построена сводная таблица, связывающая ранее независимые направления в единое целое через категории теории ДИВЭ.

### **Обобщенная система динамических аналогий и теория ДИВЭ**

Динамической аналогией называют систему, математическое описание которой тождественно описанию другой, отличающейся от первой физическими свойствами или их проявлениями (например в механике, электротехнике, теплотехнике, акустике, реологии [3]).

Теория динамических аналогий основана на подобии уравнений, важным шагом является ее дальнейшее обобщение, которое позволит расширить области ее применения в качестве аппарата исследования физических проблем.

Анализ методов физической надежности [5] показал, что информацию о внутренней структуре работающего элемента (следовательно, и о его индивидуальной надежности) несет постоянная времени переходного процесса, так как она является функцией нагрузки.

Определенные статистические характеристики при специальном подходе также несут информацию о внутренней структуре работающих элементов – например, статистический инфракрасный метод определения белка в зерне [6].

Простейшая динамическая система (аналогия) обязательно должна иметь два различных элемента с переменной функцией (вход – выход) и одну связь между ними. Аналогично в методах дискретно-импульсного ввода энергии одна из исходных фаз должна быть отрицательной (переменной), табл.4., п.2.

Элементарная система является диссипативно-консервативной, т.е. обладает способностью рассеивать и накапливать энергию. Сопrotивление диссипативного элемента, как правило, выбирают постоянным, так как именно этот параметр отражает основные свойства диссипативности системы, т.е. рассеяние поступающей энергии принципиально не ограничено.

Сопrotивление консервативного элемента не может быть постоянным, потому что накопление энергии любой системой (консервативным элементом) конечно. Конечность в накоплении энергии может быть достигнута двумя путями: либо увеличением сопротивления консервативного элемента до максимального значения, либо его уменьшением до минимума [3]. В том и дру-

гом случае будет достигнут эффект прекращения поступления энергии в систему для накопления, а там, где реализуются эти два случая, система представляет собой дуальную цепь [2].

### **Физические методы в теории надежности и теория ДИВЭ**

Все явления и предметы в окружающем мире подчиняются действию статистических и динамических законов, которые соотносятся между собой, как единство противоположностей.

В теории надежности, в первую очередь, нашли применение статистические законы, в том числе и в методах прогнозирования надежности. Важным шагом в развитии теории надежности явилось установление связи между физическими параметрами элементов и статистическими характеристиками надежности. Такая характеристика, как например, интенсивность отказов, в физической надежности определяется не на основании испытаний выборки, а в результате анализа физических параметров изделия, их предельных значений и законов статистического распределения этих параметров в пределах допусков. Известна формула, описывающая динамический закон, устанавливающий однозначную связь между длительностью работы  $T$  объекта и величиной дефекта  $\Delta S$  при условии, что  $\Delta S_{крит} = \text{const}$ :

$$\Delta S = a_0 (ct)^T. \quad (1)$$

В работах Б.С. Сотскова [7] эта формула получена и использована для перехода к обобщенной характеристике, учитывающей как динамические законы, так и статистические (распределение в зоне допусков). Формулу (1) запишем в виде

$$t_{pec} = f(\Delta S_{крит} - \Delta S_{изм}). \quad (2)$$

Выражение (1) позволяет, если будет измерено  $\Delta S$ , определить  $t_{pec}$ , т.е. долговечность элемента с точностью, зависящей от точности измерения  $\Delta S$  и допуска  $\Delta S_{крит}$ .

Для элементов, отказы которых обусловлены наличием дефекта, деформирующим (сжимающим, в терминах теории ДИВЭ) функциональные характеристики, можно использовать раз-

личные способы выявления дефектов, например, исследование переходных процессов включения или статические.

### **Реология, физика надежности и теория ДИВЭ**

Физическое направление в надежности основывается на общей методологии, базирующейся на реологических принципах. Реология дает общие критерии оценки механических и электрических свойств твердого тела. Ф. Эйрих [3] указывал на универсальность реологии.

Учитывая, что надежность – свойство изделия, которое проявляется при нагружении его во времени, ее можно рассматривать как реологический параметр. Согласно [3, 8] реологическое поведение материала определяется соотношением, содержащим значения напряжений, деформаций и их производных во времени. Это соотношение называется реологическим уравнением состояния материала, а параметры, входящие в него, характеризуют свойства материала. Они являются реологическими постоянными коэффициентами или модулями, тогда как напряжения и деформации представляют собой реологические переменные.

Реологическое тело может быть образовано двумя основными типами элементов:

1) накопителем энергии (консервативный элемент – емкость, индуктивность, упругость и др.);  
– существенно сжимаемой фазой (в терминах теории ДИВЭ);

2) рассеивателем энергии (диссипативный элемент – электрическое активное сопротивление, механическое сопротивление трения и т.д.);  
– основная система без существенно сжимаемой фазы (в терминах теории ДИВЭ).

Реальные тела, деформированные (сжатые) какими-либо физическими воздействиями, обладающими определенными физическими характеристиками, в том числе и переходными, могут быть заменены реологической моделью и исследованы независимо от их реальной структуры [10]. Такие реологические структуры получили название динамических аналогий. В определенном смысле реологическим телом является и статистическая совокупность элементов. Если пользоваться экспоненциальным законом рас-

пределения отказов, можно выделить реологические переменные и реологические постоянные, например интенсивность отказов  $\lambda$ . Эту величину следует рассматривать как обратную постоянной времени процесса. Она определяется произведением реологической емкости на реологическое диссипативное сопротивление.

Различные виды реологических элементов неодинаково реагируют на воздействия различных видов энергии. При этом все существующие виды энергетических воздействий могут быть сведены один к другому. В то же время форма движения может переходить в другую, т.е. энергия характеризует взаимосвязь всех форм движения в их взаимных преобразованиях.

Уравнение Лагранжа для системы рассеивания можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial T}{\partial g_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial g_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial g_i} = Q_i = \frac{\partial \Phi}{\partial g_i}. \quad (3)$$

Обобщенным сопротивлением называют отношение обобщенной силы к его обобщенной скорости. Представление о переходном сопротивлении возникает при изучении действия сил, произвольно меняющихся во времени. Отношение мгновенного значения обобщенной силы к мгновенному значению обобщенной скорости дает величину переходного сопротивления  $Z(t)$ , представляющего собой функцию времени:

$$Z(t) = \frac{Q(t)}{\dot{g}(t)}. \quad (4)$$

Уравнения преобразователя-четырёхполюсника описывают его свойства независимо от внутренней структуры, которая до определенного момента не имеет значения. Электромеханические аналогии позволяют изучать внутренние структуры преобразователей.

Нелинейность статистических характеристик приводит к зависимости постоянной времени от нагрузки  $k_n$ . Зависимость  $\tau = f(k_n)$  является основным информативным параметром для прогнозирования надежности изделий электронной техники. Динамическое звено описывается дифференциальным уравнением, решение которого дает значение коэффициента и выражение для переменного процесса при включении (выключении).

Табл. 1. Аналогии электрических, механических и тепловых величин

Электрические величины	Механическая модель	Теплотехнические величины
Количество электричества, э.д.с.	Деформационное напряжение	Количество теплоты
Сила тока	Скорость деформации	Тепловой поток
Емкость	Податливость	Тепловая емкость
Активное сопротивление	Вязкость	Тепловое сопротивление

чении) звена под нагрузку. Примеры простейших аналогий приведены в табл. 1.

**Статистический и физический подходы в надежности, измерениях и технологиях**

Вопрос о соотношении физического и вероятностно-статистического методов в теории измерений не нов и рассмотрен в работах М.А. Парнюка, В.Г. Пушкина, Б.В. Бирюкова, В.Т. Столярова, Л.А. Петрушенко, И.Д. Пахомова, И.Д. Панцхавы [9]. Принципы и феномены дополнительности, обратной связи, локализации разрушающих воздействий, защитных реакций, неоднородности, статистические и динамические законы измерения, анализ структуры совокупностей и плодотворная идея копий – неполный перечень результатов, использование которых в теории измерений является актуальным.

В табл. 2 приведены данные, характеризующие применение принципа дополнительности в надежности и теории измерений, т.е. существуют две системы понятий, диалектически противоположные и дополняющие друг друга.

**Надежность и свойства объектов.** Надежность всегда связана с функционированием, без него в широком понимании нет надежности. Надежность характеризует свойство объекта, проявляющееся в его способности функционировать, обладать заданной функцией в течение определенного

отрезка времени. Функция связана со структурой объекта, но является более гибкой, чем структура, поскольку обусловлена не только структурой объекта, но и его состоянием.

Надежность объекта определяется соотношением нагрузка – прочность и предельно допустимых значений физических величин, между напряжением и прочностью [7]. Состояние объекта неизменно, если не изменяется структура и функциональные свойства объекта сохраняются на первоначально заданном уровне все воздействующие на объект факторы. Потеря объектом заданной надежности связана с его самопроизвольным изменением состояния. Заданное состояние предполагает определенную структуру, свойства и воздействующие факторы. Объект абсолютно и неограниченно надежен, если заданное состояние сохраняется во времени неизменным. В действительности неизменность состояния объекта практически исключена за счет изменения величин воздействующих факторов, структуры и свойств объекта.

Воздействующие факторы изменяются по внешним причинам, связанным с условиями эксплуатации и за счет изменения структуры под действием указанных факторов. Целесообразно различать эти два вида изменения воздействующих факторов. Если предположить постоянство внешних воздействий, что с заданной точностью обеспечивается технологически, то можно выде-

Табл. 2. Принципы дополнительности в технике

Закон	Статистический	Динамический
Объект	Статистическая совокупность	Элемент совокупности
Вид испытаний	Разрушение	Неразрушение
Метод оценки надежности	Вероятностно-статистический	Физический
Характер отказа	Случайный, равновероятный для любого члена совокупности	Определяется величиной скрытого дефекта, неслучайный

лить собственную надежность объектов. При постоянстве внешних воздействий изменение состояния зависит только от структуры и свойств объекта. Устойчивость структуры к изменению определяет ее надежность. Известны два основных вида изменения структуры: равномерное и неоднородное, когда происходит локализация нагрузки в так называемом слабом звене структуры.

Надежность большинства технических объектов определяется процессами изменения в слабом звене структуры (изменения в неоднородности). Процесс изменения структуры в неоднородностях предполагает последовательный набор состояний, предшествующих потере объектом заданных функций. Скорость процесса изменения состояний объекта с первоначального до критического определяет величину надежности объекта, которую можно измерить.

Измерение надежности (статистический подход). Надежностные свойства можно измерить. Любое тело, свойства которого известны хотя бы частично, можно использовать в качестве измерительного прибора: прибор должен взаимодействовать с объектом определенным образом, чтобы проявить нужные свойства. В качестве такого прибора можно использовать саму статистическую совокупность, однако полученные измерения будут бесполезны, поскольку объект (совокупность) перестанет существовать. Поэтому следует отказаться от использования статистической совокупности в качестве собственного измерительного прибора. Достаточно использовать часть совокупности — так называемую выборочную или репрезентативную совокупность. Такой способ дает достоверное знание об элементах совокупности, вошедших в «прибор» и вероятное знание относительно членов генеральной совокупности. Сама форма вероятностного детерминизма не предполагает детерминированности каждого отдельного явления из общей массы. Следовательно, отказы элементов совокупности случайны и равновероятны.

*Измерение надежности (физический подход).* При исследовании факторов, определяющих поведение элемента или простой системы, достаточным является учет двух из них: внутренней неоднородности и внешней нагрузки. Это можно обосновать тезисом о том, что все выявленные до

сих пор фундаментальные законы природы выражают существенную взаимосвязь довольно ограниченного числа параметров для каждого из рассматриваемых объектов. Изменения в структуре объектов происходят всегда под действием энергии от внутренних или внешних источников. Различают обратимые (функциональные) и необратимые (надежностные) изменения. Структура определяет порядок распределения энергии в системе: она может быть распределена однородно или неоднородно. Неоднородное распределение энергии создают искусственно для обеспечения функциональных возможностей объекта. Информация есть мера неоднородности в распределении энергии в пространстве и времени.

Поскольку неоднородности — концентраторы нагрузки — находятся под удельными напряжениями (общий термин воздействия), большими, чем соседние однородные участки, крутизна нелинейной характеристики будет всегда отличаться от крутизны однородных участков. Это обстоятельство является основным при разработке физических методов контроля надежности и состава веществ. В определенных условиях испытаний неоднородность — дефект должна выдавать сигнал, отличный от соответствующих сигналов участков, которые полагают однородными. Техника такого выделения сигналов неоднородностей продолжает развиваться. При наличии дефектных неоднородностей реализуется соотношение минимальная прочность — максимальная нагрузка, т.е. имеется положительная обратная связь разрушения.

Превращение статистической совокупности в дискретный ряд копий позволяет заменить ее динамической (совокупностью), что содержит в себе возможности сокращения разрушающих испытаний с целью определения характеристик состава веществ.

### **Снижение энергопотребления при использовании преобразователей наноразмеров**

По нашему мнению, одной из идей теории ДИВЭ (применительно к приборостроению) является многократное снижение энергозатрат, необходимых для функционирования приборов.

Табл. 3. Характеристики классических и новых технических решений в приборостроении

Параметр	Классическая измерительная система	Современные технические решения
Тактовая частота	до 4 ... 5 МГц более 200 нс	10 ... 300 МГц 3 ... 100 нс
Рабочее пространство излучателя	до 20 мм	8 ... 40 нм
Напряжение питания	110 ... 220 В	3 ... 15 В
Удельное напряжение в рабочем пространстве	$1 \cdot 10^{-5}$ В/нм	$4 \cdot 10^{-1}$ В/нм
Превышение градиента относительно классических схем	1	$10^4$
Модуляция	до 500 кГц	до 100 МГц
Весовые характеристики	10 ... 15 кг	до 1 кг

Так, например, при анализе состава веществ, образующих структуру пшеницы, используют источники излучения мощностью 50...100 Вт, что исключает возможность снижения габаритов устройств и времени измерений. В то же время, применение маломощных источников (полупроводниковые лазеры, светоизлучающие диоды) позволяют в десятки и сотни раз уменьшить потребление энергии и получить приборы с высокими метрологическими характеристиками и свойствами (табл. 3).

Уменьшение энергопотребления происходит в основном за счет импульсного целенаправленного ввода энергии. Импульс позволяет сосредоточить энергию, а затем направить ее в определенные точки заданного объема. Кроме того, при применении маломощных источников энергий упрощаются вопросы модуляции световых потоков; возникают новые возможности и идеи при применении теории цвета и измерениях цветности веществ [6, 11].

**Использование принципов дискретно-импульсного ввода энергии в приборостроении**

В серии приборов ЦУ ТЕП, разработки ИТТФ, используется принцип дискретно-импульсного ввода энергии в малогабаритные источники излучения (светодиодные излучатели) с различной длиной волны излучения, что позволяет исключить громоздкие оптические системы

с лампами накаливания от 25 до 100 Вт, дорогостоящие дифракционные решетки и интерференционные фильтры, упростить возможность перестройки базовой схемы прибора на различные модификации (определение белизны муки, цветности масел, содержания белка в сое, пшенице, ячмене), уменьшить весогабаритные и энергопотребляющие характеристики в десятки и сотни раз.

**Категории при анализе теории ДИВЭ относительно приборостроения**

На основе вышеизложенного были сформулированы и систематизированы объединяющие научные направления на базе теории ДИВЭ в табл. 4. В ней представлены 12 категорий, характерных для ИК-методов измерений, теории надежности и технологий. Несомненно, что такая таблица, составленная впервые, будет расширяться и совершенствоваться, что позволит найти новые приложения теории.

**Выводы**

Приведенный анализ позволяет расширить применение теории ДИВЭ для развития физики надежности и теории измерений состава веществ инфракрасными методами и методами теории цветовых измерений. На базе теории ДИВЭ, рассмотренной относительно приборостроения, возможно использование идей при создании новых приборов и систем для энергетики, задач аг-

Табл. 4. Категории при анализе теории ДИВЭ для различных научных направлений

№	Наименование	Технологии	Прогнозирование надежности	Определение состава ИК-методами
1	2	3	4	5
1	Организованный поток энергии (вход)	Ориентированное энергосиловое воздействие, обеспечивающее выполнение заданных технологических задач.	Организованное энергосиловое воздействие на структуру электронного элемента с целью определения дефектов и прогнозирования ресурса.	Поток лучистой энергии, содержащей ИК-излучение, соответствует определенному веществу в многокомпонентной смеси.
2	Многокомпонентная система	Многофазная либо однофазная, трансформируемая в многофазную, система. При этом одна из исходных или имитируемых фаз должна быть существенно сжимаемой.	Структура электронного элемента, содержащая неоднородности, отличающаяся, например, скоростью переменных процессов на неоднородности (дефекты).	Спектральная характеристика вещества, характеристическая линия на которой при взаимодействии с организованной энергией (подаваемой на вход четырехполюсника) несет информацию о составляющей этого вещества.
3	Дефект	Сжимаемая фаза возникает преимущественно в окрестностях “дефектов” структуры системы.	Часть структуры рабочего тела электронного компонента, на которую приходится большая удельная нагрузка, ускоряющая разрушение.	Часть спектра (спектральная линия), однозначно характеризующая определенную составляющую многокомпонентной смеси.
4	Дискретно-неоднородное распределение энергии	Распределение сжимаемой фазы по счетному числу точек технологического объема.	Неравномерное распределение энергии по объему рабочего тела электрического элемента за счет наличия скрытых дефектов.	Неоднородное распределение потока лучистой энергии по длинам волн, прошедшей через исследуемый объект за счет спектральных неоднородностей.
5	Импульсное воздействие во времени	Обеспечивает образование существенных градиентов значений технологических параметров (давления, скорости, температуры).	Обеспечивает преимущественное увеличение удельной энергии на “дефекте”, идентификация которой прогнозирует ресурс.	Позволяет создавать малогабаритные высокоточные измерительные устройства.
6	Сильные воздействия на систему	Применяются в специальных технологиях переработки продуктов и веществ.	Применяются для осуществления укоренных испытаний на надежность.	Применяются в совмещенных процессах пробоподготовки, обработки и измерения, например определение влаги в продуктах путем интенсивной ИК-сушки и автоматического взвешивания.

продолжение таблицы

7	Слабые воздействия на систему	Не применяются.	Применяются для прогнозирования срока службы электронных элементов	Применяются при измерении состава спектральными методами (цветовые измерения).
8	Информационный выход системы	Как правило, не имеет.	При разрушающих испытаниях – не применяется. Используют при неразрушающих испытаниях (прогнозирование).	Применяют во всех случаях пробоподготовки и измерений.
9	Принцип ДИВЭ	Осуществлен в многофазных и в системах, трансформируемых в многофазные.	Осуществим для реальных электронных элементов с помощью аппаратных и программных методов.	Универсально применим при осуществлении разработок приборов для определения состава веществ.
10	Нанометрические структуры. Взаимодействие с энергией	Нанообъекты взаимодействуют с амплитудно-дисперсно-организованной энергией: образуются новые свойства.	Структуры <i>p-n</i> переходов в микросхемах и микропроцессорах.	Дифракционные решетки, ИК-излучение. Взаимодействие с веществом через дифракционную решетку (цветовые измерения).
11	Энергетика в нанометрическом пространстве	Взаимодействие энергии с дисперсными нанообъектами позволяет экономить расходуемую энергию.	Слабые воздействия локализуются в нанообъектах информационной структуры; - эффекты повышения и управления надежностью.	Выделение энергопотоков, взаимодействующих в данных нанометрических пространствах позволяет определять состав веществ и материалов.
12	Материалы. Формирование новых свойств	При сильных воздействиях в нанометрических структурах возникают вещества с новыми свойствами и характеристиками - положительные эффекты нанотехнологий.	При сильных воздействиях в специальных нанометрических структурах развиваются процессы пробоя и деградации; - новые регрессивные свойства.	Определение количественных показателей качества структуры позволяет совершенствовать вещества и материалы в нужном направлении.

ропромышленного комплекса, нефтехимии и других отраслей народного хозяйства. На стыке теории ДИВЭ и спектральных методов измерений определено новое направление цветовых измерений и измерений в ИК области спектра – создан и запатентован ряд приборов малой энергоемкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Долинский, Б.И. Басок, С.И. Гулый, А.И. Накорчевский, Ю.А. Шурчкова. Дискретно-

импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996. – 204 с.

2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.

3. Ф. Эйрих. Реология. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 824 с.

4. Гутенмахер Л.И. Электрические модели. – Киев: Техніка, 1975. – 175 с.

5. Некрасов М.М., Платонов В.В., Дадеко Л.И. Испытания элементов радиоэлектронной аппа-



ратуры. Физические методы надежности. — Киев: Вища школа, 1983. — 304 с.

6. *Дадеко Л.И., Ковальчук А.В., Лотар С.Л., Платонов В.В.* О новых возможностях анализатора белка АБЗ-1 при использовании нового красителя // Хранение и переработка зерна. — 2004, №10. — С. 17 — 18.

7. *Сотсков Б.С.* Анализ надежности элементов с учетом влияния внешних воздействий. В кн.: Технические средства управления и вопросы их надежности. — М.: Наука, 1974. — С. 37 — 44.

8. *Reiner, M.* Deformation Strain and Flow: An Elementary Introduction to Rheology. — London: H. K. Lewis & Co. Ltd, 1960. — 347p.

9. *Пушкин В.Г.* Проблема надежности. — М.: Наука, 1971. — 189 с.

10. *Постников В.С., Павлов В.С., Гриднев С.А.* Исследование особенностей пьезокерамики динамическим методом // В сб.: Релаксационные явления в твердых телах. — Металлургия, 1968. — С. 515 — 517.

11. *Дадеко Л.И., Ковальчук А.В., Лотар С.Л., Платонов В.В.* Экспресс-метод и прибор автоматического определения цветности растительных масел по международной шкале. // Олійно-жировий комплекс. — 2004. — №3. — С. 71 — 73.

*Статья печатается в порядке обсуждения.*

*Получено 26.09.2007 г.*

УДК 681.121.42

**КРУКОВСКИЙ П.Г., ПОЛУБИНСКИЙ А.С.,  
ПАРХОМЕНКО Г.А., ЦВЯЩЕНКО Е.В., КОВАЛЕНКО В.Н.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТУРБИННОГО РАСХОДОМЕРА ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМИРУЮЩИХ РАСХОДНО-ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Розглянуто методику отримання апроксимаційних залежностей витрато-частотних характеристик витратоміра газу турбінного типу, яка базується на використанні залежностей гідродинамічних сил на лопатці турбіни від частоти її обертання та витрати газу, котрі отримані за допомогою CFD-моделей. Показано, що отримані апроксимаційні залежності відрізняються від залежностей, отриманих за допомогою CFD-моделей на 0,1 % для стаціонарних та до 0,5 % для нестационарних режимів. Отримані залежності з урахуванням сил тертя та інерції рухомих частин витратоміру можуть бути використані у коректорах для урахування похибки витратомірів як в стаціонарному, так і в нестационарному режимах роботи, що також показано в роботі.

Рассмотрена методика получения аппроксимирующих зависимостей расходно-частотных характеристик расходомера газа турбинного типа, основанная на использовании зависимостей гидродинамических сил на лопатке турбины от частоты ее вращения и расхода газа, которые получены с помощью трехмерных CFD-моделей. Показано, что полученные аппроксимирующие зависимости отличаются от зависимостей, полученных с помощью CFD-моделей на 0,1 % для стационарного и до 0,5 % для нестационарного режимов. Полученные зависимости с учетом сил трения и инерции подвижных частей расходомера могут быть использованы в корректорах для учета погрешностей расходомеров как в стационарных, так и переходных режимах работы, что также проиллюстрировано в работе.

The technique of reception of approximating dependences of flow rate-frequency characteristics of a turbine type gas flowmeter is considered, based on use is dependent hydrodynamical forces on turbine blade on frequency of its rotation and the charge of gas which are received by means of three-dimensional CFD-models. It is shown, that received approximate dependences differ from the dependences received by means of CFD-of models on 0.1 % for a stationary case and up to 0,5 % for non-stationary cases. Received dependences with taking into consideration friction forces and inertia of flowmeter moving parts can be used in correctors for flowmeter accuracy in stationar and non-stationary cases, witch is shown in this work.