



Научный журнал
Орловского государственного
технического университета

Выходит четыре раза в год

№ 1/269(544) 2008

ИЗВЕСТИЯ ОрелГТУ

Серия «Фундаментальные и прикладные
проблемы техники и технологии»

Редакционный совет:

Голенков В.А., *председатель*
Радченко С.Ю., *зам. председателя*
Борзенков М.И.
Колчунов В.И.
Попова Л.В.
Степанов Ю.С.

Главный редактор серии:

Степанов Ю.С.

Заместители

главного редактора серии:

Гордон В.А.
Киричек А.В.
Константинов И.С.
Подмастерьев К.В.

Редколлегия:

Бабичев А.П.
Вдовин С.И.
Дмитриев А.М.
Емельянов С.Г.
Еременко В.Т.
Зубарев Ю.М.
Зубчанинов В.Г.
Иванов Б.Р.
Иванников А.Д.
Колесников К.С.
Корндорф С.Ф.
Коськин А.В.
Малинин В.Г.
Осадчий В.Я.
Панин В.Е.
Поляков А.А.
Распопов В.Я.
Смоленцев В.П.
Сотников В.В.

Ответственный за выпуск:

Константинова Г.А

Адрес редколлегии серии:

302020, г. Орел, Наугорское шоссе,
29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Зарег. в Министерстве РФ

по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовой информации.

Свидетельство: ПИ № 77-15496 от
20 мая 2003 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса
России»

© ОрелГТУ, 2008

Содержание

Естественные науки

Гордон В.А., Потураева Т.В. Оценка динамического эффекта при внезапной структурной перестройке конструкции	3
Малинин В.Г., Малинин В.В. Двухуровневый структурно-механический градиентный критерий разрушения	8
Шоркин В.С. Краевые задачи механики деформируемых тел с условиями на ребрах и угловых точках границы	14
Сошкин Р.В. Некоторые прикладные задачи раскрытия и методы их решения	22
Гасанов Ш.Г. Пластические деформации у края трещины, выходящей на границу раздела сред	29

Информационные системы и технологии

Константинов И.С., Бизин И.В. Модель формирования фантома на основе трехмерного эталона в АСНИ методов реконструкции томограмм	33
Поляков А.А. Проблемы управления в информационном обществе	37

Машиностроение и металлообработка

Брусоев С.И., Жуплов М.В., Тарапанов А.С. Профилирование дисковых фрез для обработки винтовых поверхностей на основе виртуального отображения кинематической схемы резания	41
Сытин А.В. Моделирование трения Кулона при расчете характеристик лепестковых газодинамических подшипников	45
Панченко А.И. Определение несущей способности многослойных подшипников жидкостного трения с учетом промежуточных граничных условий	50

Приборостроение и системы управления

Подмастерьев К.В., Степанов Ю.С., Петрова О.С. Моделирование устройства контроля и регулирования температуры воздуха с наклонной пергородкой	54
Пахолкин Е.В., Фокин Н.Н. Практические аспекты разработки методики диагностирования моторных масел по вязкостно-температурным свойствам	60
Багринцев Д.Ю., Иванов Ю.Б. Фотодатчики высокой чувствительности для контроля механических перемещений	66
Богданов Н.Г., Щекотихин С.Н. Исследование генераторов для контроля толщины немагнитных покрытий вихревыми токами	71
Лунин М.В. Модельное исследование параметров пузырькового расходомера	80

Журнал «Известия ОрелГТУ» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных ВАК, для публикации трудов на соискание ученых степеней.

Editorial council:

Golenkov V.A., *president*
Radchenko S.Y., *vice-president*
Borzenkov M.I.
Kolchunov V.i.
Popova L.V.
Stepanov Y.S.

Editor-in-chief
Stepanov Y.S.

Editor-in-chief Assistants:

Gordon V.A.
Kirichek A.V.
Konstantinov I.S.
Podmasteryev K.V.

Editorial Committee

Babichev A.P.
Vdovin S.I.
Dmitriev A.M.
Emelyanov S.G.
Eremenko V.T.
Zubarev Y.M.
Subchaninov V.G.
Ivanov B.R.
Ivannikov A.D.
Kolesnikov K.S.
Korndorf S.F.
Koskin A.V.
Malinin V.G.
Osadchy V.Ya.
Panin V.E.
Polyakov A.A.
Raspopov V.Ya.
Smolenzev V.P.
Sotnikov V.V.

Responsible for edition:
Konstantinova G.A.

Address

302020 Orel,
Naugorskoye Chaussee, 29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Journal is registered in State
Committee of Russian Federation
on printing. The certificate of
registration ПИ № 77-15496 from
20.05.03

Index on the catalogue of the «*Pressa
Rossii*» 29504

©OSTU, 2008

Contents

Natural Sciences

- Gordon V.A., Poturaeva T.V. Assessment of the dynamical effect under the abrupt structured rearrangement of the construction** 3
- Malinin V.G., Malinin V.V. The double-deck structural-mechanical gradient criterion of failure** 8
- Shorkin V.S. The boundary value problem of the mechanics of deformable bodies under conditions on the ribs and the salient points of the frame** 14
- Soshkin R.V. Some applied problems of the nesting pattern and solution methods** 22
- Gasanov Sh.G. Plastic deformation of the crack periphery approaching the frame of the place division** 29

Information Systems and Technologies

- Konstantinov I.S., Bizin I.V. The Generation model of phantom based on the three-dimensional etalon using the tomogram rearrangement** 33
- Polyakov A.A. The management problems in the information technology society** 37

Engineering

- Brusov S.I., Zhuplov M.V., Tarapanov A.S. The disk-shaped mill's forming for the helical surface processing based on the virtual image of the kinematic diagram of cutting** 41
- Sytin A.V. The modeling of the ampere-second friction by the property calculation of the leafed gas-dynamic bearings** 45
- Panchenko A.I. The finding of the supporting capability of the fluid friction multilayer bearings with due regard for the intermediate terminal conditions** 50

Instrument Engineering

- Podmasteryev K.V., Stepanov Y.S., Petrova O.S. The modeling of the control device and the atmospheric temperature control with the angle-plate** 54
- Pakholkin E.V., Fokin N.N. The practical facets of method preparation diagnosis of the engine oil based on the viscosity-temperature properties** ... 60
- Bagrincev D.Y., Ivanov Y.B. High response photosensors for the mechanical relocation control** 66
- Bogdanov N.G., Shekotikhin S.N. The study of the generators for the thickness control of the non-magnetic plating by the eddy currents** 71
- Lunin M.V. Model study of the bubble gage characteristics** 80

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.3

В.А. ГОРДОН, Т.В. ПОТУРАЕВА

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ВНЕЗАПНОЙ СТРУКТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКЕ КОНСТРУКЦИИ

В статье рассматривается динамический процесс, возникающий в заданной стержневой конструкции при внезапном разрушении части опорных связей.

In clause the dynamic process arising in the set rod design at sudden destruction of a part of basic communications is considered.

Рассматривается конструкция, состоящая из двух однородных стержней, жестко заземленных наружными концами в неподвижных опорах, а внутренними – в подвижном жестком включении, имеющем возможность перемещаться по вертикальной направляющей, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой постоянной интенсивности q . Размеры и вид поперечного сечения приведены на рис. 1.

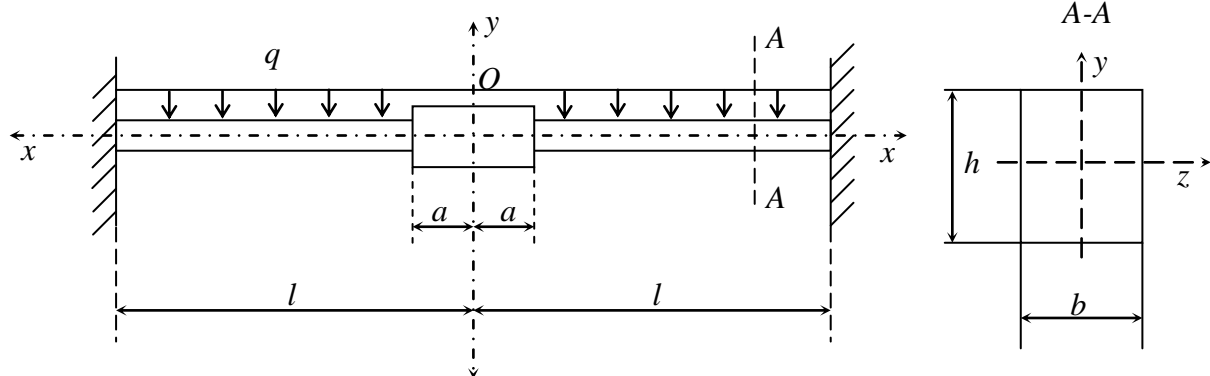


Рисунок 1 - Расчетная схема конструкции

Предполагается, что в определенный момент внутренняя заделка одного из стержней конструкции внезапно преобразуется в шарнир. В результате в конструкции возникает динамический процесс, в ходе которого деформации и напряжения могут значительно превысить рабочие статические показатели и отрицательно сказаться на функционировании или целостности конструкции.

Целью настоящей работы является построение математической модели процесса и количественная оценка последствий указанной перестройки структуры конструкции.

1 РЕШЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Ввиду симметрии конструкции и нагрузки, рассмотрим ее левую часть.

Уравнение прогибов $\eta = \eta_{ст.}(\xi)$ имеет вид

$$\eta_{ст.}^{IV} = \bar{q}, \quad (1.1)$$

где введены безразмерные переменные и параметры

$$\xi = \frac{x-a}{l-a}, \quad \eta_{cm} = \frac{\omega_{cm}}{l-a}, \quad \bar{q} = \frac{q(l-a)^3}{EJ_z}.$$

Уравнение (1.1) должно удовлетворять граничным условиям

$$\eta_{ст.}(1) = 0, \quad \eta'_{ст.}(1) = 0, \quad \eta'_{ст.}(0) = 0, \quad \eta'''_{ст.}(1) = 0. \quad (1.2)$$

Решение уравнения (1.1), удовлетворяющее граничным условиям (1.2), имеет вид

$$\eta_{cm} = \frac{\bar{q}}{24}(\xi^2 - 1)^2 \quad (1.3)$$

Безразмерное нормальное напряжение в произвольном сечении $\bar{\sigma}$ выражается через изгибающий момент \bar{M}

$$\bar{\sigma}_{cm} = \bar{M} = \eta''_{cm} = \frac{\bar{q}}{6}(3\xi^2 - 1), \quad (1.4)$$

где обозначено

$$\bar{\sigma}_{cm} = \sigma_{cm} \frac{(l-a)W_z}{EJ_z}, \quad \bar{M}_{cm} = M_{cm} \frac{l-a}{EJ_z}, \quad W_z = \frac{2J_z}{h}$$

W_z – момент сопротивления сечения;

J_z – осевой момент инерции.

Наибольшее нормальное напряжение развивается в левой заделке и определяется из (1.4) при $\xi = 1$

$$\bar{\sigma}_{наиб} = \frac{\bar{q}}{3}. \quad (1.5)$$

Напряжение в правой заделке

$$|\bar{\sigma}(0)| = \frac{\bar{q}}{6}.$$

2 РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Пусть в некоторый момент времени защемление при $\xi = 0$ в левой части конструкции внезапно преобразовалось в шарнир. В правой части конструкции условия опирания остались прежними. В результате этого в нагруженной (деформированной) конструкции начнется динамический процесс, определяемый кинематическими начальными условиями

$$\eta_{дин}(\xi, 0) = \eta_{ст.}(\xi), \quad \dot{\eta}_{дин}(\xi, 0) = 0. \quad (2.1)$$

Уравнение изгибных колебаний левой части в безразмерном виде

$$\frac{\partial^4 \eta}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} = \bar{q}(\xi), \quad (2.2)$$

где введено безразмерное время τ

$$\tau = \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{(l-a)^2} \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho A}},$$

здесь ρ , E – погонная плотность и модуль упругости материала стержня; A – площадь поперечного сечения; ω_0 – частота изгибных колебаний.

Решение уравнения (2.2) должно удовлетворять граничным условиям

$${}^n\eta(1) = 0, \quad {}^n\eta'(0) = 0, \quad {}^n\eta''(0) = 0, \quad {}^n\eta'''(0) = 0. \quad (2.3)$$

Полагая собственные колебания левой части гармоническими с частотой λ , разделяя переменные в однородном уравнении, соответствующим (2.2), получим формы собственных колебаний левой части

$${}^nW_n = {}^nC_{1n} \sin(\sqrt{\lambda_n}\xi) + {}^nC_{2n} \cos(\sqrt{\lambda_n}\xi) + {}^nC_{3n} sh(\sqrt{\lambda_n}\xi) + {}^nC_{4n} ch(\sqrt{\lambda_n}\xi). \quad (2.4)$$

Выразим постоянные интегрирования ${}^nC_{in}$ ($i = \overline{1,4}$) через начальные параметры

$${}^nW_{n0} = {}^nW_n(0), \quad {}^nW'_{n0} = {}^nW'_n(0), \quad {}^nW''_{n0} = {}^nW''_{n0}(0), \quad {}^nW'''_{n0} = {}^nW'''_{n0}(0),$$

тогда формы собственных колебаний приобретают вид

$${}^nW_n = {}^nW_{n0}K_{4n}(\xi) + {}^nW'_{n0}K_{3n}(\xi) + {}^nW''_{n0}K_{2n}(\xi) + {}^nW'''_{n0}K_{1n}(\xi) + {}^nW_{n0}K_{1n}(\xi), \quad (2.5)$$

где $K_{in} = K_{in}(\xi)$ ($i = \overline{1,4}$) – функции Крылова

$$K_{1n} = \frac{-\sin(\sqrt{\lambda_n}\xi) + sh(\sqrt{\lambda_n}\xi)}{2\lambda_n\sqrt{\lambda_n}}, \quad K_{2n} = \frac{-\cos(\sqrt{\lambda_n}\xi) + ch(\sqrt{\lambda_n}\xi)}{2\lambda_n},$$

$$K_{3n} = \frac{\sin(\sqrt{\lambda_n}\xi) + sh(\sqrt{\lambda_n}\xi)}{2\sqrt{\lambda_n}}, \quad K_{4n} = \frac{\cos(\sqrt{\lambda_n}\xi) + ch(\sqrt{\lambda_n}\xi)}{2}.$$

Заметим, что функции Крылова связаны между собой соотношениями

$$K'_{1n} = K_{2n}, \quad K'_{2n} = K_{3n}, \quad K'_{3n} = K_{4n}, \quad K'_{4n} = \lambda_n^2 K_{1n}$$

и

$$K_{1n}(0) = K_{2n}(0) = K_{3n}(0) = 0, \quad K_{4n}(0) = 1.$$

Разделяя переменные в граничных условиях (2.3) и удовлетворяя им представлением (2.5), получим систему алгебраических однородных уравнений относительно начальных параметров ${}^nW_{n0}$ и ${}^nW'_{n0}$

$$\begin{cases} {}^nW_{n0}K_{4n}(1) + {}^nW'_{n0}K_{3n}(1) = 0, \\ \lambda_n^2 {}^nW_{n0}K_{1n}(1) + {}^nW'_{n0}K_{4n}(1) = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Начальные параметры ${}^nW'_{n0}$, ${}^nW'''_{n0}$ обращаются в ноль. Условием существования нетривиальных решений системы (2.6) является равенство нулю определителя системы Δ

$$\Delta = \begin{vmatrix} K_{4n}(1) & K_{3n}(1) \\ \lambda_n^2 K_{1n}(1) & K_{4n}(1) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.7)$$

Это и есть частотное уравнение для левой части конструкции.

Корнями этого уравнения являются частоты собственных колебаний λ_n . Приведем значения первых пяти частот:

$${}^n\lambda_1 = 1,875, \quad {}^n\lambda_2 = 4,694, \quad {}^n\lambda_3 = 7,850, \quad {}^n\lambda_4 = 10,99, \quad {}^n\lambda_5 = 14,13.$$

Формы собственных колебаний левой части имеют вид

$${}^n W_n(\xi) = K_{4n}(\xi) - \frac{K_{4n}(1)}{K_{3n}(1)} K_{3n}(\xi).$$

Решение неоднородного уравнения (2.2) ищем в виде разложения по собственным функциям ${}^n W_n(\xi)$ с неизвестными функциями ${}^n Q_n(\tau)$ в качестве коэффициентов

$${}^n \eta(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} {}^n Q_n(\tau) {}^n W_n(\xi) \quad (2.8)$$

Функции ${}^n Q_n(\tau)$ найдем, подставляя (2.8) в уравнение (2.2) и используя свойство ортонормированности форм собственных колебаний ${}^n W_n(\xi)$, из уравнения

$$\frac{\partial^2 {}^n Q_n}{\partial \tau^2} + \lambda_n^2 {}^n Q_n = {}^n R_n, \quad (2.9)$$

где обозначено

$${}^n R_n = \frac{\int_0^1 \bar{q}(\xi) {}^n W_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 {}^n W_n^2(\xi) d\xi}.$$

Интегрируя уравнение (2.9) и используя метод вариации произвольных постоянных, найдем

$${}^n Q_n(\tau) = D_{1n} \sin(\lambda_n \tau) + D_{2n} \cos(\lambda_n \tau) + \frac{{}^n R_n}{\lambda_n^2} \sin\left(\frac{\lambda_n \tau}{2}\right) \quad (2.10)$$

Постоянные D_{1n}, D_{2n} определяются из начальных условий (2.1)

$$D_{1n} = 0, \quad D_{2n} = \frac{\int_0^1 \eta_{cm}(\xi) {}^n W_n(\xi) d\xi}{\int_0^1 {}^n W_n^2(\xi) d\xi}.$$

Поступая аналогично, найдем формы собственных колебаний для правой части конструкции

$${}^n W_n = {}^n W_{n0} K_{4n}(\xi) + {}^n W'_{n0} K_{3n}(\xi) + {}^n W''_{n0} K_{2n}(\xi) + {}^n W'''_{n0} K_{1n}(\xi).$$

Граничные условия для этой части принимаем в виде

$${}^n \eta(1) = 0, \quad {}^n \eta'(1) = 0, \quad {}^n \eta''(1) = 0$$

и учтем условие сопряжения частей

$${}^n \eta(0) = {}^n \eta'(0).$$

Два неизвестных начальных параметра определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} {}^n W''_{n0} K_{2n}(1) + {}^n W'''_{n0} K_{4n}(1) = -K_{4n}(1), \\ {}^n W''_{n0} K_{3n}(1) + {}^n W'''_{n0} K_{2n}(1) = -\lambda_n^2 K_{1n}(1). \end{cases}$$

Параметр ${}^n W'_{n0} = 0, {}^n W_{n0} = {}^n W'_{n0}$.

Формы собственных колебаний правой части имеют вид

$${}^n W_n = K_{4n}(\xi) + M_n(1) K_{2n}(\xi) + N_n(1) K_{1n}(\xi),$$

где обозначено

$$M_n(1) = \frac{\lambda_n^2 K_{1n}^2(1) - K_{2n}(1)K_{4n}(1)}{K_{2n}^2(1) - K_{1n}(1)K_{3n}(1)}$$

$$N_n(1) = \frac{-\lambda_n^2 K_{1n}(1)K_{2n}(1) + K_{3n}(1)K_{4n}(1)}{K_{2n}^2(1) - K_{1n}(1)K_{3n}(1)}$$

Неизвестная функция ${}^{\Pi}\eta(\xi, \tau)$ представляется в виде

$${}^{\Pi}\eta(\xi, \tau) = \sum {}^{\Pi}W_n(\xi) {}^{\Pi}Q_n(\tau) \tag{2.11}$$

Функции ${}^{\Pi}Q_n(\tau)$ являются решениями дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 {}^{\Pi}Q_n}{\partial \tau^2} + \lambda_n^2 {}^{\Pi}Q_n = {}^{\Pi}R_n,$$

откуда

$${}^{\Pi}Q_n(\tau) = {}^{\Pi}D_{2n} \cos(\lambda_n \tau) + \frac{{}^{\Pi}R_n}{\lambda_n^2} \sin\left(\frac{\lambda_n \tau}{2}\right).$$

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Последовательным дифференцированием функций динамических прогибов (2.8) и (2.11) получаем углы поворота поперечных сечений $\frac{\partial \eta}{\partial \xi}$ и кривизны $\frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2}$.

$$\frac{\partial \eta}{\partial \xi} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(\tau) \frac{dW_n}{d\xi}, \quad \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(\tau) \frac{d^2 W_n}{d\xi^2}.$$

Изгибающие моменты в произвольном сечении пропорциональны кривизне

$$\bar{M}_{дин} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2}.$$

Наибольшие изгибающие моменты $\bar{M}_{дин}$, так же, как наибольшие изгибающие моменты в исходном статическом состоянии $\bar{M}_{ст}$, локализуются во внешних заделках $\xi = 1$ и являются функциями времени. Найдем момент времени τ^* , когда динамическое напряжение в опасном сечении (левой части) $\xi = 1$ будет наибольшим. Для этого найдем экстремум функции времени

$${}^n\bar{M}_{дин\max}(1, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left({}^nD_{2n} \cos(\lambda_n \tau) + \frac{{}^nR_n}{\lambda_n^2} \sin\left(\frac{\lambda_n \tau}{2}\right) \right) \frac{d^2 {}^nW_n}{d\xi^2} \Big|_{\xi=1}. \tag{3.1}$$

Сначала, приравнявая производную этой функции по τ нулю, найдем время τ^* (точку экстремума), а затем, подставляя это время в (3.1), найдем сам экстремум.

Как показали расчеты с учетом семи членов ряда (3.1), первый максимум функции ${}^n\bar{M}_{дин\max}(1, \tau)$ наступает при $\tau^* = 0,87$ и равен $1,004 \bar{q}$.

Введем коэффициенты, характеризующие эффект внезапного изменения условий опирания внутреннего конца левой части.

Одним из коэффициентов, количественно характеризующих эффект указанной внезапной перестройки структуры конструкции (расчетной схемы), является коэффициент $K_{дин1}$, рассчитываемый как отношение динамического напряжения $\bar{\sigma}_{дин\max} = {}^n\bar{M}_{дин\max}(1, \tau^*)$ к

максимальному напряжению $\bar{\sigma}_{c\delta}$, развивающемуся при квазистатическом преобразовании внутренней заделки в шарнир

$$K_{дин_1} = \frac{\bar{\sigma}_{дин \max}}{\bar{\sigma}_{ст \max_1}}.$$

Другим фактором, также характеризующим динамический процесс, может служить коэффициент $K_{дин}$, показывающий, во сколько раз максимальное напряжение в ходе динамического процесса после внезапного изменения расчетной схемы превосходит максимальное напряжение в исходном статическом состоянии

$$K_{дин} = \frac{\bar{\sigma}_{дин \max}}{\bar{\sigma}_{ст \max}}$$

В нашем случае получаем

$$K_{дин_1} = \frac{1,004}{0,5} = 2, \quad K_{дин} = \frac{1,004}{0,3} = 3.$$

Таким образом, очевидно, что учет трехкратного повышения напряжений в опасном сечении конструкции необходим при оценке ее прочности и безопасности эксплуатации.

Гордон Владимир Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Математика»
Тел.(4862) 41-98-48
E-mail: gordon@ostu.ru

Потураева Татьяна Вячеславовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Математика»
Тел.(4862) 41-98-48
E-mail: tanpo77@mail.ru

УДК 539.4:620.179

В.Г. МАЛИНИН, В.В. МАЛИНИН

ДВУХУРОВНЕВЫЙ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ГРАДИЕНТНЫЙ КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ

На основе системного подхода структурно-аналитической мезомеханики формулируется двухуровневый структурно-механический, градиентный критерий разрушения, позволяющий развить методики оценки параметров трещиностойкости и учитывающий влияние зон структурных концентраторов на прочность в окрестности макроконцентратора напряжений.

On the basis of the system approach structural - analytical mezomechanic it is formed two-level structural - mechanical gradiental criterion of the destruction, allowing to develop techniques of an estimation of parameters crack of resistance and taking into account influence of zones of structural concentrators on durability in a vicinity of the macroconcentrator of stresses.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прочностное состояние нагруженного твердого тела находится между хрупким и вязким, различие между которыми в механическом аспекте зависит от вида напряженно-

деформированного состояния, истории нагружения, эволюции дефектной структуры и определяется соотношением энергетических затрат на обратимые и необратимые явления деформирования. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения прочностного состояния материала в изделиях с макроконцентраторами с учетом влияния структурного состояния на микро- и мезомасштабном уровнях и влияния неоднородности макронапряженного состояния на локальные механические характеристики материала. Поставленную задачу можно решать в рамках градиентного подхода оценки локальной прочности в зоне концентрации напряжений, рассматривая состояние материала по двум критериям с непрерывным переходом из одного в другой.

Построение структурно-механического двухуровневого критерия разрушения дает возможность объединить области использования критериев разрушения на структурном, микро- и мезомасштабном уровнях с критериями макроскопического предельного состояния, что позволяет прогнозировать различные предельные состояния материала. Такой критерий может основываться на известных однопараметрических критериях силового, энергетического, деформационного, структурного характера и их комбинации.

В механике прочности материалов одни двухкритериальные подходы предполагают дискретный переход от состояния к состоянию, другие - непрерывный. Например, два полярных типа разрушения – хрупкое и вязкое – удается описать единой диаграммой механического состояния Н.Н. Давиденкова и Я.Б. Фридмана [1]. Процесс деформирования в этом случае представлен либо соответствующей линией, либо точкой в пространстве напряжений, отражающей интенсивность напряженного состояния. Эта точка в случае безопасного состояния находится внутри предельной поверхности, которая в условиях близкого к всестороннему растяжению ограничена сопротивлением материала отрыву, а в условиях преимущественного сдвига – сопротивлением среза. При этом два вида сопротивления материалов в определенных условиях предполагаются независимыми один от другого, в то время как в общем случае между ними естественно можно обнаружить связь. Аналогичный подход можно предложить и для описания предельных состояний деталей с макроконцентраторами, находящимися под нагрузкой. Эффективно использовать системный подход, учитывающий структурно-механические и градиентные критерии предельного состояния.

Градиентный подход к оценке локальной прочности в зоне концентрации напряжений развивался в работах С.В. Серенсена, Н.Н. Афанасьева, Н.Н. Давиденкова, М.Ф. Новопашина, С.В. Сукнева, А.М. Иванова, М.А. Легана и др. [2]. Получены различные модели, отражающие эффект влияния неоднородности напряженного состояния на локальные механические характеристики материала.

В названных подходах не учитывалось влияние локализации напряженного состояния на дефектную структуру, в частности, на зоны структурных концентраторов напряжений (ЗСКН) и их изменение в окрестности макроконцентратора в процессе деформирования. Развитие нового метода неразрушающего контроля, метода магнитной памяти металла (ММП) и создание на его основе соответствующих приборов сканирования магнитных характеристик, отражающих эволюцию структурных концентраторов, позволяют при формулировке градиентных критериев учесть влияние ЗСКН. Появилась практическая возможность анализировать реакцию реальной дефектной структуры в конкретном месте изделия в зависимости от истории нагружения и вида напряженного состояния в зоне макроконцентратора.

Целью настоящей работы является формулировка двухуровневого структурно-механического градиентного критерия разрушения, установление его взаимосвязи с линейной механической трещин и развитие на его основе метода оценки критических размеров дефектов.

ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ

При неоднородном напряженном состоянии в зоне концентрации напряжений для формулировки критерия хрупкого разрушения отрывом на макромасштабном уровне будем сравнивать с пределом прочности материала σ_B максимальное значение эффективного напряжения σ_1^* , которое меньше максимального значения первого главного напряжения σ_1 (принятого в качестве эквивалентного в критерии нормального отрыва):

$$\sigma_1^* = \sigma_1 / \left(1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_1q_2} \right); \quad (1)$$

$$q_1 = |\text{grad} \sigma_1| / \sigma_1; \quad (2)$$

$$q_2 = \left| \frac{dH_p}{dl} \right|^{\max} / \left| \frac{dH_p}{dl} \right|^{\text{cp}}; \beta = \frac{L}{d} q_2, \quad (3)$$

где q_1 - относительный градиент первого главного напряжения, находится из упругого решения соответствующей краевой задачи; q_2 - относительный градиент нормальной компоненты собственного магнитного поля рассеивания (H_p) - характеризует на мезомасштабном уровне деформационную способность металла на стадии упрочнения; L - параметр, имеет размерность длины и характеризует эффективный размер структурных концентраторов напряжений [3]; обозначения *max* и *cp* в (3) указывают на максимальное и среднее значение градиента H_p в окрестности макроконцентратора; d - характерный размер макроконцентратора напряжений.

В случае развития трещин поперечного или продольного сдвига в зоне концентрации напряжений для формулировки критерия разрушения срезом будем сравнивать с пределом прочности на срез τ_s максимальное значение эффективного напряжения τ_{\max}^* , которое меньше максимального касательного напряжения τ_{\max} (принятого в качестве эквивалентного в критерии разрушения срезом):

$$\tau_{\max}^* = \tau_{\max} / \left[1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_2q_3} \right] \quad (4)$$

$$q_3 = |\text{grad} \tau_{\max}| / |\tau_{\max}|, \quad (5)$$

где q_3 - относительный градиент максимального касательного напряжения τ_{\max} .

Рассмотрим вариант двухуровневого критерия разрушения, предполагая, что для образования и развития трещины в окрестности макроконцентратора необходимо выполнение критерия разрушения как на макромасштабном, так и на микро- и мезомасштабном уровнях [1,4].

Рассмотрим вначале случай разрушения детали с макроконцентратором по механизму отрыва. Будем считать, что разрушение отрывом в окрестности рассматриваемой локальной макроточки начнется при достижении эффективным напряжением σ_1^* предела прочности σ_B [5] при обязательном выполнении критерия разрушения на мезоструктурном уровне, т.е. при достижении параметром q_2 значения q_{np} [3]. Тогда, принимая во внимание условие, согласно которому первоначальное распространение макротрещины будет происходить по площадке действия первого главного напряжения и наступит только при выполнении двух условий, сформулируем окончательный макроскопический критерий разрушения отрывом Π_0^M в виде:

$$\Pi_0^M = H(\sigma_1^* - \sigma_B) H(q_2 - q_{np}), \quad (6)$$

где $H(x)$ - функция Хевисайда.

Заметим, что в общем случае максимальные значения эффективного напряжения σ_1^* и структурного параметра q_2 могут достигать в точке, не совпадающей с точкой максимального значения первого главного напряжения. Поэтому при расчете на прочность с использованием критерия (1)-(6) необходимо проверять критерии (6) не только в вершине концентратора, но и других точках тела. В соответствии с уравнением (6), если $\Pi_0^M = 1$, то тело разрушится, и оно не будет разрушено, если $\Pi_0^M = 0$. Таким образом, макроскопическое разрушение тела с макроконцентратором напряжений произойдет тогда, когда критического уровня достигнут и эффективные напряжения σ_1^* (в этом случае отражается силовой характер разрушения) и параметр q_2 , что характеризует кинетическую природу разрушения. Отметим, что параметр q_{np} характеризует степень структурной неоднородности и предельную деформационную способность металла в зонах структурных концентраторов напряжений [3].

Пусть теперь в окрестности макроконцентратора напряженно-деформированное и структурно-кинетическое состояние соответствуют варианту разрушения путем развития трещин поперечного или продольного сдвига. Для формулировки критерия разрушения, как и при формулировке критерия в случае разрушения отрывом, применим гипотезу, согласно которой макроскопическое разрушение в зоне концентрации напряжений произойдет, если будут выполнены критерии разрушения как на мезоструктурном ($q_2 = q_{np}$), так и на макромасштабном уровне, т.е. при достижении эффективного касательного напряжения τ_{max}^* значения предела прочности на срез τ_s . Тогда окончательный критерий разрушения срезом Π_C^M на макромасштабном уровне примет вид:

$$\Pi_C^M = H(\tau_{max}^* - \tau_{max})H(q_2 - q_{np}). \quad (7)$$

Отметим, что, как и в случае критерия разрушения нормальным отрывом (6), максимальные значения эффективного напряжения τ_{max}^* и структурного параметра q_2 в критерии разрушения срезом (7) могут достигаться в точке, не совпадающей с точкой максимального значения касательного напряжения τ_{max} , и необходимо проверять критерий (7) как в вершине концентратора, так и в других точках тела.

Вязкое состояние тела без макроконцентратора наступает при достижении параметром нагрузки P (вместо которого иногда можно использовать напряжение σ) предельной величины P_ϵ . Величина P_ϵ определяется наступлением пластического течения по всему рассматриваемому сечению (или временного сопротивления σ_B).

Сформулированные критерии разрушения (6), (7), отражающие различные случаи предельного состояния, можно объединить и записать обобщенный критерий разрушения в виде:

$$\Pi_\Sigma^M = H(q_2 - q_{np}) [H(\sigma_1^* - \sigma_\epsilon) + H(\tau_{max}^* - \tau_{max})] + H(P - P_\epsilon). \quad (9)$$

Рассмотрим взаимосвязь структурно-механического критерия с линейной механикой разрушения на примере анализа хрупкого разрушения отрывом. Используя уравнения (1)–(3), (6), получим формулу для номинального разрушающего напряжения σ_{np}^{**} , используемую в задачах о концентрации напряжений. Рассчитаем номинальное напряжение σ^{**} как максимальное напряжение ($\max \sigma_1$) деленное на коэффициент концентрации α [5]:

$$\sigma^{**} = (\max \sigma_1) / \alpha.$$

Компонент напряжения σ_1 в вершине концентратора напряжений определяется из (1), (6) учитывая, что в момент начала разрушения $\Pi^M = 1$, т.е. $\sigma_1^* = \sigma_\epsilon$, а $q_2 = q_{np}$.

Тогда уравнение для предельного номинального напряжения σ_{np}^{**} примет вид:

$$\sigma_{np}^{**} = \frac{\sigma_\epsilon}{\alpha} \left(1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_1q_{np}} \right) \quad (10)$$

Рассмотрим применение структурно-механического градиентного критерия (6) к известной задаче об одноосном растяжении плоскости, содержащей эллиптическое отверстие [6].

Опуская промежуточные выкладки для упругой задачи, растяжение пластины с эллиптическим отверстием, получим следующую формулу для относительного градиента q_1 в вершине концентратора:

$$q_1 = (\alpha - 1)^2 \left(1 + \frac{1}{2\alpha} \right) / d, \quad (11)$$

где $\alpha = 1 + 2a/b$ - коэффициент концентрации напряжений; $d=2a$ – размер эллиптического отверстия вдоль опасного сечения.

Подставляя (11) в формулу (10), получим уравнение для номинального разрушающего напряжения:

$$\sigma_{np}^{**} = \frac{\sigma_\epsilon}{\alpha} \left[(1 - \beta) + \sqrt{\beta^2 + L(\alpha - 1)^2 \left(1 + \frac{1}{2\alpha} \right) \frac{q_{np}}{d}} \right]. \quad (12)$$

В предельном случае, для макроконцентратора в виде трещины при $\alpha \rightarrow \infty$ получим:

$$\sigma_{np}^{**} = \sigma_\epsilon \sqrt{Lq_{np}/d}. \quad (13)$$

Следуя [5], используя соотношения линейной механики разрушения, можно выразить σ_{np}^{**} через полную длину трещины d и критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} в виде:

$$\sigma_{np}^{**} = K_{1c} \sqrt{2/(\pi d)}. \quad (14)$$

Сравнивая соотношения (13) и (14) получим уравнение связывающее параметр L с характеристиками прочности σ_ϵ , трещиностойкости K_{1c} и структурным параметром q_{np} .

$$L = \left[2/(\pi q_{np}) \right] (K_{1c} / \sigma_\epsilon)^2 \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что эмпирический параметр L в предложенном критерии разрушения имеет размерность длины, выражен через известные характеристики материала, предел прочности σ_ϵ , критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} и магнитный параметр q_{np} , [3].

При малых размерах концентраторов напряжений в виде отверстий, полостей и трещин значение номинального напряжения σ_{np}^{**} в момент начала разрушения может превысить предел прочности σ_ϵ , что согласно (1)-(3), (6) противоречит физическому смыслу задачи. Для нахождения границы применимости структурно-механического градиентного критерия разрушения в задачах о растяжении бесконечных плоских и объемных тел с макроконцентраторами напряжений в виде отверстий и внутренних полостей, будем основываться на выполнении равенства:

$$\sigma_{np}^{**} = \sigma_\epsilon. \quad (16)$$

Используя формулы (1)-(3) и уравнение (6), найдем границы применимости обсуждаемого критерия для задачи одноосного растяжения пластины с эллиптическим отверстием. Подставляя формулу (12) в уравнение (16), получим соотношение для оценки критического размера отверстия d_* опасного сечения:

$$d_* = \left[L(\alpha - 1) \left(1 + \frac{1}{2\alpha} \right) q_{np} \right] / (\alpha - 1 + 2\beta). \quad (17)$$

Применение структурно-механического градиентного критерия (1)-(3) (6) при размерах отверстия меньших, чем d_* , противоречит физическому смыслу. Рассмотренный подход можно использовать для оценки критических размеров дефектов в виде отверстий, внутренних полостей, пор.

ВЫВОДЫ

1. Сформулирован двухуровневый структурно-механический градиентный критерий разрушения.

2. Установлена его взаимосвязь с линейной механикой трещин.

3. Предложен метод оценки критических размеров дефектов.

В заключение следует отметить, что влияние зон структурных концентраторов напряжений в реальном объекте на трещиностойкость и характеристики прочности зависит от многих факторов: истории и режимов нагружения, масштабного эффекта и др. Включение в обобщенный критерий разрушения параметров q_2 , q_{np} позволяет сформулировать постановку задачи анализа влияния указанных факторов на параметры трещиностойкости и прочностные характеристики объектов с макроконцентраторами.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность профессору А.А.Дубову за ценные консультации по методу магнитной памяти металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев, В.А. Структурно-аналитическая теория прочности [Текст]/ В.А. Лихачев, В.Г. Малинин. – Спб.: Наука, 1993. – 471с.
2. Новопашин, М.Д. Упругопластическое деформирование и предельное состояние конструкции с концентраторами напряжений [Текст]/ М.Д. Новопашин, С.В. Сукнев, А.В. Иванов. - Новосибирск: Наука. Сибирская изд. Фирма РАН, 1995-112 с.
3. Дубов, А.А. Методы магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля [Текст]: учеб. пособие /А.А. Дубов, Ал. А. Дубов, С.М. Колокольников. - Изд. ЗАО «Тиссо», 2003., 320 с.
4. Малинин, В.Г Структурно-аналитическая мезомеханика деформируемого твердого тела [Текст]/ В.Г. Малинин, Н.А. Малинина. - Физ. мезомех. – 2005. Т.8. №5. с. 31-45.
5. Леган, М.А. О градиентном подходе к оценке прочностных свойств хрупких материалов в зоне максимальных напряжений [Текст]/ М.А. Леган // Динамика сплошной среды: Сб. научн. трудов. – Новосибирск. ИГиЛ, 1990. Вып. 98-с. 49-60.
6. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст]/ Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

Малинин Владислав Георгиевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор физико-математических наук
Тел. (4862) 419813; E-mail: malinin@ostu.ru

Малинин Владимир Владиславович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Ведущий инженер, старший преподаватель

КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ С УСЛОВИЯМИ НА РЕБРАХ И УГЛОВЫХ ТОЧКАХ ГРАНИЦЫ

Классическая теория упругости рассматривает краевые задачи для тел, ограниченных гладкими поверхностями. При необходимости рассмотрения границ с ребрами и угловыми точками последние заменяются гладкой поверхностью с большой, но конечной кривизной. Рассмотрены две модели сплошной среды, позволяющие обойтись без использования скругления острых участков границы. Первая – градиентная теория. Вторая – теория, основанная на представлении о теле как объединении системы тел разной размерности: трехмерной внутренности, двухмерной гладкой части границы, ее одномерных ребер и нуль-мерных угловых точек.

The classical theory of elasticity considers regional problems for the bodies limited by smooth surfaces. If necessary considerations of borders with edges and angular points the last are replaced with a smooth surface with big, but final curvature. Two models of the continuous environment are considered, allowing to do without use of a rounding off of sharp sites of border. The first is the gradient theory. The second is the theory based on representation about a body as association of system of bodies of different dimension: Three-dimensional interior, two-dimensional smooth part of border, its one-dimensional edges and zero-dimensional of angular points.

Классическая краевая задача, поставленная на ограниченной области, использует краевые условия на гладких участках границы. Поэтому, даже в случае необходимости решения задач с условиями на линиях и в точках, принадлежащих границе, эти условия «размазываются» по бесконечно малым окрестностям этих геометрических мест на поверхности, содержащей их, что делает точную постановку задачи предельной. Кроме того, принцип затвердевания, используемый в механике сплошных сред, утверждает, что тело и любая его часть в каждый момент времени находится в равновесии под действием внешних для него сил так, если в рассматриваемый момент времени они являются абсолютно твердыми. В то же время известно, что в механике абсолютно твердого тела используются не только силы, распределенные по площади ее гладких участков, но и силы, распределенные вдоль линий, как являющихся ребрами, разделяющими гладкие участки, так и лежащие на этих участках, а также силы, приложенные в точках.

Рассмотрим ситуацию с принципом затвердевания более подробно. Для определенности и краткости изложения сделаем анализ ситуации лишь в плоском случае для слоя тела единичной толщины. Допускается, что некоторое подобное тело B подвержено действию сил, распределенных по объему V области, занимаемой B , с плотностью $\vec{f}(\vec{r})$, $\vec{r} = \vec{e}_j x_j$, $\vec{e}_j \cdot \vec{e}_k = \delta_{jk}$, по гладкой части его границы S с плотностью $\vec{\sigma}(\vec{r})$, а также по ребру L с плотностью $\vec{\tau}(\vec{r})$. (Для обозначения множества точек и его меры используется один и тот же символ.) Допускается, что тело B находится в равновесии. Учитывая принцип затвердевания, независимо от того, является ли B абсолютно твердым или деформируемым, если в рассматриваемый момент времени известна его конфигурация, то для этого момента необходимо записать равенство

$$\int_V \vec{f} dV + \int_S \vec{\sigma} dS + \int_L \vec{\tau} dL = \vec{0} \quad (1)$$

Обратим внимание на то обстоятельство, что с точки зрения механики силы $\vec{f} dV$, $\vec{\sigma} dS$ и $\vec{\tau} dL$ считаются приложенными в центрах масс соответствующих элементов, которые не могут по своему определению принадлежать границам этих

элементов. Значит, векторные поля $\vec{f}(\vec{r})$, $\vec{\sigma}(\vec{r})$, $\vec{\tau}(\vec{r})$ определены на внутренностях V , S , L соответствующих точечных множеств.

Учтем также, что

$$\vec{f} dV = \vec{f} dx_1 \wedge dx_2 \wedge dx_3 \quad (2)$$

это дифференциальная антисимметричная 3-форма, определенная на 3-х мерной открытой области V [1]. В этом случае на основании теоремы Пуанкаре, связывающей 2-формы и 3-формы на этой же области, существует тензор второго ранга P такой, что

$$\vec{f} = -\nabla \cdot P \quad (3)$$

Отсюда, с учетом теоремы Остроградского, можно получить:

$$\int_V \vec{f} dV = -\int_V \nabla \cdot P dV = -\int_S \vec{n} \cdot P dS \quad (4)$$

В механике деформируемых сплошных сред используется принцип разрезания, посредством которого в рассмотрение вводятся внутренние силы. Согласно этому принципу тело может быть мысленно разрезано какой-то поверхностью на две части. Действие одной из частей на другую заменяется действием распределенных по поверхности разрезания сил. Если таким образом в сплошной среде вырезать тетраэдр Коши, то можно ввести тензор напряжений T , развивающихся в среде. Если площадка тетраэдра с нормалью \vec{n} является частью граничной поверхности S , то будет выполняться равенство

$$\vec{n} \cdot T = \vec{\sigma} \quad (5)$$

Однозначность представления напряженного состояния посредством тензора второго ранга приводит к равенству:

$$P = T \quad (6)$$

Откуда следует

$$\int_V \vec{f} dV + \int_S \vec{\sigma} dS = \vec{0} \quad (7)$$

что противоречит соотношению (1).

Предложены два выхода из изложенной ситуации. Первый состоит в следующем [2].

Тензорное поле $P(\vec{r})$ на области V представляется в виде суммы

$$P = P + P' \quad (8)$$

На основании той же теоремы Пуанкаре для второго слагаемого посредством равенства

$$P' = -\nabla \cdot P \quad (9)$$

вводится еще один тензор напряжений, но уже третьего ранга, который, как можно выяснить, является обобщенной силой, которой соответствует обобщенное перемещение, являющееся

не первым, как для P^1 , а вторым градиентом вектора перемещений $\vec{u}(\vec{r})$. Следствием (8) и (9) является краевая задача для тензоров P^1 и P^2 :

$$\vec{f} + \nabla \cdot \left(P^1 - \nabla \cdot P^2 \right) = \vec{0}; \quad \vec{r} \in V^0 \quad (10)$$

$$\vec{n} \cdot (P^1 - \nabla \cdot P^2) - \nabla_S \cdot (\vec{n} \cdot P^2) = \vec{\sigma}; \quad \text{или} \quad \vec{u} = \vec{u}_S \quad \vec{r} \in S^0 \quad (11)$$

$$\vec{n} \cdot P^2 = \vec{m}; \quad \text{или} \quad \nabla_{\vec{n}} \vec{u} = (\nabla_{\vec{n}} \vec{u})_S \quad \vec{r} \in S^0 \quad (12)$$

$$\left[(\vec{N}\vec{n})_+ + (\vec{N}\vec{n})_- \right] \cdot P^2 = \vec{\tau} \quad \text{или} \quad \vec{u} = \vec{u}_L \quad \vec{r} \in L^0 \quad (13)$$

Анализ этой системы свидетельствует о том, что проведенные рассуждения наряду с достижением поставленной цели – введение в рассмотрение линейно распределенных сил, привели к необходимости использования нового типа внешних воздействий – поверхностно распределенных гиперсил [3], обобщенными перемещениями для которых являются градиенты $\nabla_{\vec{n}} \vec{u}$.

Второй путь введения линейно распределенных сил состоит в представлении о том, что трехмерное тело и его поверхность – это два независимых тела разной размерности, находящиеся в постоянном взаимодействии [4], [5]. Трехмерное и двухмерное тела занимают лишь открытые множества точек. На его границе всегда располагается двухмерное тело. Внешние воздействия на каждый вид тел всегда происходят только через их внутренние точки.

В рассматриваемой ситуации внешнее действие $\vec{f} dV$ вызывает противодействие $(-\nabla \cdot P) dV$ такое, что выполняется равенство (3). Среда, составляющая изучаемое трехмерное тело B , передает окружению, контактирующему с ним по поверхности S , суммарное воздействие

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV = \int_V (-\nabla \cdot P) dV = \int_S (-\vec{n} \cdot P) dS \quad (14)$$

Это воздействие распределено вдоль внутренности S с плотностью $(-\vec{n} \cdot P)$. Поскольку B контактирует с двухмерным телом, занимающим S^0 , а на него со стороны окружающей среды действуют распределенные с плотностью $\vec{\sigma}$ силы, то оказывается, что каждая частица dS подвержена действию силы

$$d\vec{\varphi} = (\vec{\sigma} - \vec{n} \cdot P) dS \quad (15)$$

Согласно упомянутой выше теореме Пуанкаре, на множестве S^0 можно построить такой тензор второго ранга R , что

$$\vec{\sigma} - \vec{n} \cdot P = -\nabla_S \cdot R \quad (16)$$

Интегрируя это равенство, с учетом теоремы Остроградского, примененной на S , можно прийти к необходимости введения распределенных вдоль границы области S – линии L , являющейся ребром на границе тела B , сил, которые удовлетворяют равенству

$$(\vec{N}_+ + \vec{N}_-) \cdot R = \vec{\tau} \quad (17)$$

Недостатком представленных моделей является то, что линейно распределенные силы могут быть определены лишь на ребрах, где $\vec{N}_+ \neq -\vec{N}_-$. Несмотря на определенную ограниченность, связанную с выполнением этого неравенства, предложенные модели нашли свою реализацию для приложений.

Первый вариант реализован в рамках линейной теории упругости материалов второго порядка [6], дополненной гипотезой о начальном напряженном состоянии [7,8,9]. Считается, что любое тело B , ограниченное поверхностью S , получается путем мгновенного выделения из бесконечной среды Q . Состояние B до выделения принимается в качестве отсчетного. Частицы B находятся в силовом поле, созданном совокупностью частиц, образующих внешность B в Q . Силовые линии имеют касательный единичный вектор \vec{E} , который на границе S совпадает с ее внешней единичной нормалью \vec{n} . Действие внешнего поля уравнивается действием внутренних сил, для описания которых используются два тензора напряжений. Первый 1P , совершает работу на обобщенных перемещениях, образующих первый градиент истинных перемещений \vec{u} . Вторым 2P , совершает работу на компонентах второго градиента перемещений. Напряженное состояние в B до его выделения из Q описывается тензором второго типа, который определяется равенством

$${}^2P_0 = T_0 \cdot \vec{E} \quad (18)$$

Здесь: $T_0 = \pi_0 \delta_{ij} \delta_{rk} \vec{e}_i \vec{e}_j \vec{e}_k \vec{e}_l$ – тензор четвертого ранга. Он характеризует способность изотропной среды развивать описываемое напряженное состояние; π_0 – вновь вводимая физическая постоянная; \vec{e}_k – ортонормированный базис; $k = 1, 2, 3$. Допускается также, что изменение объемной плотности потенциала внутренних сил, вызванное деформацией, определяется зависимостью

$$w = \mu g_{ij} g_{ij} + \frac{\lambda}{2} g_{kk} g_{ll} + (2\mu + \lambda) b^2 Z_{ijk} Z_{ijk} + \pi_0 \delta_{ij} E_k Z_{ijk}, \quad (19)$$

где: $g_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ – компоненты классического тензора деформаций; $Z_{ijk} = u_{i,jk}$ – компоненты второго градиента перемещений; δ_{ij} – символ Кронекера; μ, λ – коэффициенты Ламе; b – дополнительная постоянная. Компоненты 1P и 2P определяются дифференцированием правой части (19) по g_{ij} и Z_{ijk} соответственно.

Для определения значений дополнительных упругих постоянных b и π_0 в соответствии с формулами

$$\pi_0 = \frac{W_p}{k}; b = \frac{3W_p}{4k^2 A_1}; k = \lambda / (2\mu + \lambda); 2A_1 = 2\mu + \lambda, \quad (20)$$

полученными в рамках предлагаемой теории при решении задачи о состоянии полубесконечного тела, использовались данные косвенных экспериментов по определению поверхностной энергии твердых тел [2] в предположении о том, что она равна поверхностному натяжению. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

№	Элемент	$W_p Dg / M^2$	$b \cdot 10^{11} M$	$\pi_0 Dg / M^2$
1	Mg	0,73	2,67	1,28
2	Al	1,04	4,65	1,92
3	Si	1,24	7,54	3,21
4	Ni	1,44	2,49	2,50
5	Cu	1,12	1,89	1,57
6	Ag	0,95	1,98	1,28
7	Au	1,23	1,29	1,46

Под адгезией двух твердых деформируемых тел $B^{(1)}$ и $B^{(2)}$ в рассматриваемой модели среды понимается такой вид их контакта, когда прямолинейное материальное волокно, нормальное к поверхности контакта S_a и пересекающее ее, в процессе деформации объединенного тела $B = B^{(1)} \cup B^{(2)}$ сохраняет не только свою целостность (как в случае классического, жесткого контакта), но и гладкость.

Энергия адгезии тел $B^{(1)}$ и $B^{(2)}$ определяется обычно убылью на единицу площади образовавшегося адгезионного шва – поверхности стыка, вдоль которой произошло слипание, их свободной энергии [10]. Для ее расчета получена формула [11]:

$$F = \frac{W_p^{(1)}W_p^{(2)}(k^{(1)} + k^{(2)})^2}{W_p^{(1)}k^{(2)2} + W_p^{(2)}k^{(1)2}}; \quad k^{(j)} = \frac{\nu^{(j)}}{1 - \nu^{(j)}}; \quad (21)$$

$\nu^{(j)}$ – коэффициент Пуассона для материала тела $B^{(j)}$; $W_p^{(j)}$ – его поверхностная энергия; $j = 1, 2$. Результаты проверки теории представлены в таблице 1.

Таблица 2 - Значения энергии адгезии для Al, Ag, Cu на стекле (эксперимент [12]) и кремнии (теория)

Металл	Энергия адгезии на кремнии (Дж/м ²)	Энергия адгезии на стекле (Дж/м ²)
Алюминий (Al)	0,214	0,150
Серебро (Ag)	0,181	0,120
Медь (Cu)	0,210	0,110

Сопоставляемые данные соизмеримы.

Учитывая реальность принятой модели упругой среды, подтвержденную изложенными выше действиями, рассмотрены задачи о действии сосредоточенной силы на вершину клина и о растяжении плоскости, ослабленной вырезом [13]. Клин занимал область: $0 \leq x_k < +\infty$; $k = 1, 2$. Сила действовала вдоль биссектрисы угла. Вырез плоскости в координатах $\eta_j = x_j/b$ описывался уравнениями: $\eta_2 = \pm \beta [1 - (\eta_1/\alpha)^2]$; $|\eta_1| \leq 1$. Растягивающая сила с постоянной интенсивностью σ действовала вдоль координатной оси

$O\eta_2$. Система дифференциальных уравнений во введенных безразмерных координатах приобрела вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \eta_1^2} + \frac{1-k}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \eta_2^2} + \frac{1+k}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \eta_1 \partial \eta_2} &= \frac{\partial^4 u_1}{\partial \eta_1^4} + 2 \frac{\partial^4 u_1}{\partial \eta_1^2 \partial \eta_2^2} + \frac{\partial^4 u_1}{\partial \eta_2^4} \\ \frac{1-k}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \eta_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \eta_2^2} + \frac{1+k}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \eta_1 \partial \eta_2} &= \frac{\partial^4 u_2}{\partial \eta_1^4} + 2 \frac{\partial^4 u_2}{\partial \eta_1^2 \partial \eta_2^2} + \frac{\partial^4 u_2}{\partial \eta_2^4} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Учитывая, что при бесконечном удалении от границ изучаемых тел вызванные ими возмущения напряженно-деформированного состояния должны исчезнуть, делается попытка подобрать частное решение этой системы уравнений, содержащее произвольные постоянные, удовлетворяющее этому условию, – подобно подстановке Эйлера для обыкновенных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом предполагается, что так же, как и в случае обыкновенных уравнений, для введенных произвольных постоянных будет получено характеристическое уравнение.

Решение ищется в виде

$$u_j = B_j e^{-m\eta_1 - n\eta_2}; \quad j = 1, 2; \quad m, n = const; \quad B_j = const \quad (23)$$

Ввиду однородности системы дифференциальных уравнений для B_j получается однородная система алгебраических уравнений. Обращение в ноль ее определителя приводит к характеристическому уравнению, связывающему постоянные m, n . Их значения принадлежат связанным между собой непрерывным множествам D_m, D_n . В рассматриваемом конкретном случае оказалось:

$$m = \rho \cos \varphi; \quad n = \rho \sin \varphi; \quad \rho = 1, \quad \rho = \sqrt{\frac{1-k}{2}}; \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \quad (24)$$

Учитывая, что при каждом значении аргумента φ функции (23) являются решением системы (22), можно получить, что интегралы по D_m, D_n от функций (23) также являются решениями уравнений (22).

Задача с клином наиболее показательна, поскольку в ней наиболее четко выделена особенность, отличающая ее постановку от классической. Поэтому далее внимание уделяется именно ей. С учетом симметрии задачи далее принято, что

$$B_1 = B_1(\varphi) = U(\varphi) \cos \varphi; \quad B_2 = B_2(\varphi) = U(\varphi) \sin \varphi \quad (25)$$

$$u_1 = \int_{\varepsilon}^{\pi/4-\varepsilon} U(\varphi) \cos \varphi e^{-(\eta_1 \cos \varphi + \eta_2 \sin \varphi)} d\varphi \quad (26)$$

$$u_2 = \int_{\varepsilon}^{\pi/4-\varepsilon} U(\varphi) \sin \varphi e^{-(\eta_1 \cos \varphi + \eta_2 \sin \varphi)} d\varphi \quad (27)$$

Здесь функция $U(\varphi)$ подлежит определению на основании краевых условий.

В системе краевых условий компоненты вектора перемещений и их производные по координатам содержатся в виде элементов обращающихся в ноль определенных линейных комбинаций, за исключением одной, соответствующей угловой точке. Можно убедиться, что среди непрерывных функций нет таких, которые могли бы удовлетворить таким условиям.

Выход из ситуации найден в форме представления функции $U(\varphi)$ в виде:

$$U(\varphi) = U(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{B_j}{j!} \delta(t - t_j); \quad t = \sin \varphi \quad (28)$$

Кроме того, на границах $\eta_1 = 0; \eta_2 = 0$ экспоненты, стоящие под интегралами (26) и (27), раскладываются в степенные ряды в окрестности начала координат. После выполнения этих операций требование выполнения краевых условий при любых, не обращающихся в ноль, значениях аргументов η_j приводит к появлению бесконечной, неоднородной системы линейных алгебраических уравнений для неизвестных коэффициентов B_j . Матрица коэффициентов этой системы такова [14], что позволяет найти единственную ограниченную по норме матрицу-столбец, элементами которой являются B_j .

Следствием изложенного выше подхода к решению задачи о действии сосредоточенной силы на вершину клина является ограниченность решения как для поля перемещений, так и для полей классических и неклассических напряжений.

Аналогичным путем построено решение задачи о растяжении плоскости, ослабленной вырезом с острыми углами. Поля напряжений и перемещений также оказались ограниченными, в том числе и в окрестностях угловых точек.

Вторая модель представлена задачей Ламе о напряженном состоянии толстостенной трубы, подверженной действию внутреннего и наружного давлений. Ее решение имеет следующий вид [5].

Допущения:

$$P_{r\varphi} = P_{rz} = P_{\varphi z} = P_{zz} = 0 \quad R_{\varphi z} = R_{r\varphi} = R_{rz} = R_{zz} = 0 \quad (29)$$

Уравнения равновесия:

$$\frac{\partial P_{rr}}{\partial r} + \frac{P_{rr} - P_{\varphi\varphi}}{r} = 0; \quad a < r < b, \quad 0 < \varphi < 2\pi; \quad -\infty < z < +\infty \quad (30)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial P_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} = 0; \quad \frac{\partial P_{zz}}{\partial z} = 0.$$

$$-P_{rr} + \frac{R_{\varphi\varphi}}{a} = p_a \quad r = a, \quad 0 < \varphi < 2\pi; \quad -\infty < z < +\infty$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial R_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} = 0; \quad \frac{\partial R_{zz}}{\partial z} = 0$$

$$P_{rr} + \frac{R_{\varphi\varphi}}{b} = -p_b \quad r = b, \quad 0 < \varphi < 2\pi; \quad -\infty < z < +\infty$$

$$\frac{1}{b} \frac{\partial R_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} = 0; \quad \frac{\partial R_{zz}}{\partial z} = 0.$$

$$R_{rr}(0) = R_{rr}(2\pi), \quad R_{\varphi\varphi}(0) = R_{\varphi\varphi}(2\pi)$$

Решение задачи:

$$P_{rr} = A - \frac{B}{r^2}; \quad P_{\varphi\varphi} = A + \frac{B}{r^2}; \quad P_{zz} = 0 \quad (31)$$

$$R_{\varphi\varphi} = R_a = const; \quad R_{\varphi\varphi} = R_b = const; \quad R_{zz} = 0,$$

$$R_{rr}(0) = R_{rr}(2\pi), \quad R_{\varphi\varphi}(0) = R_{\varphi\varphi}(2\pi)$$

$$P_{rr} = -\left(p_a - \frac{R_a}{a}\right) = -\pi_a \qquad P_{rr} = -\left(p_b + \frac{R_b}{b}\right) = -\pi_b$$

Изложенное выше свидетельствует о том, что к проблеме учета действия линейно распределенных сил в рамках механики деформируемых тел можно подойти, опираясь либо на теорию материалов второго порядка, либо допустив, что поверхность тела является особым, двумерным телом, взаимодействующим по законам механики с трехмерным телом, которое она ограничивает.

Изложенное свидетельствует также о том, что проблема учета действия сосредоточенных сил может быть рассмотрена с аналогичных позиций путем либо введения в рассмотрение еще и третьего тензора напряжений, совершающего работу на изменениях третьего градиента перемещений – в соответствии с первой моделью, либо допущения о том, что не только поверхности, но и линии в трехмерном пространстве могут рассматриваться как тела, независимые от трехмерных.

Изложенные приложения обеих моделей свидетельствуют об актуальности рассмотренной в работе проблемы. Это в свою очередь делает необходимым детализацию аксиоматики рассмотренных моделей, разработку соответствующего математического аппарата, дающего возможность правильно ставить конкретные задачи, получать их однозначные решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудин, У. Основы математического анализа [Текст]/ У. Рудин.–М.: Мир, 1966. – 320 с.
2. Шоркин, В.С. Напряженное состояние материалов, подверженных неклассическим воздействиям [Текст]/В.С. Шоркин. - Проблемы нелинейной механики: Сборник статей. К восьмидесятилетию Л.А. Толоконникова. – Тула:ТулГУ, 2003. – 348 с.
3. Тупин, Р.А. Теория упругости, учитывающая моментные напряжения [Текст]:сб. переводов «Механика»/ Р.А. Тупин. - 1965. – № 3. – С. 113 – 140.
4. Повстенко, Ю.В. Механика неоднородных структур [Текст] : тезисы докладов / Ю.В. Повстенко. - 3 Всес.конф., Львов, 17 – 19 сент.,1991. - 42 – Львов, 1991. – с.253
5. Гордон, В.А. Механическое взаимодействие тела и его поверхности [Текст]/ В.А. Гордон, В.С. Шоркин, Т.В. Труфанова. – Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: Материалы Межд. конгр. к 150-летию со дня рождения академика В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, 2003. – С. 219 – 223.
6. Эринген, А.К. Теория микрополярной упругости. Разрушение [Текст]/ А.К. Эринген; под ред. Либовец Г. – т.2. – М.: Мир, 1975. – С. 646 – 751.
7. Шоркин, В.С. Особенности упругости поверхностных слоев твердых тел. [Текст]/ В.С. Шоркин. - Упругость и неупругость: Материалы междунар. научн. симп. По пробл. механики деформируемых тел, посвященного 90-летию А.А. Ильюшина. – М.: МГУ, 2001. – С. 453 – 454.
8. Шоркин, В.С. Модель упругой среды второго порядка с начальным напряженным состоянием [Текст]/В.С. Шоркин. - Вибрационные машины и технологии: Сборник научных трудов. По материалам VI научно-технической конференции «Вибрация – 2003 (Вибрационные машины и технологии)»– Курск: КурскГТУ, 2003. – С. 139 – 141.
9. Физический энциклопедический словарь [Текст]– т.1.– М.: Советская энциклопедия, 1960.– 664 с.
10. Vitkovski I.V., Konev A.N., Shorkin V.S., Kraev N.D., Rusanov A.E., Khoroshik V.M., Leonov S.A. Adhesion energy estimation of some composite materials. // Plasma Devices and Operations. – Vol. 11(2). – Taylor & Francis, 2003. – pp. 81 – 87.
11. Кемпбелл, Д.С. Механические свойства тонких пленок [Текст]/Д.С. Кемпбелл. - Технология тонких пленок. Справочник. – т.2. – М: Советское радио, 1977. – С. 246 – 304.

12. Шоркин, В.С. Напряженно-деформированное состояние в окрестности концентратора напряжений [Текст]/В.С. Шоркин. - Прикладные проблемы прочности и пластичности. – В. 54. – 1996. – С. 222 – 227.

13. Треногин, В.А. Функциональный анализ [Текст]/В.А. Треногин. – М.: Наука, 1980. – 496 с.

Шоркин Владимир Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Заведующий кафедрой «Физика»

Тел.: (4862) 41-98-44

E-mail: vshorkin@yandex.ru

УДК 519.8:62

Р.В. СОШКИН

НЕКОТОРЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ РАСКРОЯ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Российский рынок гофротары является одним из самых динамичных и конкурентных рынков упаковки в России. Одной из основных задач, возникающих при производстве упаковки, является раскрой гофрополотна. В статье рассмотрены методы решения задачи раскроя гофрополотна с набором дополнительных ограничений, включая условие ограниченности количества раскроев в оптимальном плане. Эффективность описанных в данной статье методов подтверждается опытом использования их в составе программных комплексов, реализованных на ряде предприятий ЦБП России и Украины.

The Russian market of corrugated boards is one of the most dynamical and competitive markets of packing in Russia. One of the primary goals arising by manufacture of packing, cutting of cardboard line is. In article methods of the decision of a problem of cutting of cardboard line with a set of additional restrictions, including a condition of limitation of quantity of cuts in the optimum plan are considered. Efficiency of the methods described in given article proves to be true experience of their use in structure of program complexes realized on several pulp-and-paper mills of Russia and Ukraine.

Российский рынок гофротары является одним из самых динамичных и конкурентных рынков упаковки в России. Ежегодные темпы роста этого рынка составляют 10-12%. Одна из основных задач, возникающих при производстве упаковки, - раскрой гофрополотна. Оптимизация планов раскроя - комбинаторная задача, которая должна решаться с использованием вычислительной техники, поскольку автоматизация планирования раскроев практически всегда обеспечивает значительный экономический эффект за счет сокращения неизбежных отходов и формирования более технологичных планов. Содержание задачи раскроя составляет поиск наиболее выгодного способа размещения заготовок определенного набора деталей (предметов раскроя) на кусках материала (объектах раскроя).

Конкретизация задачи раскроя, построение математической модели и выбор метода решения связаны с уточнением понятий: объектов раскроя, предметов раскроя, группы движений, определяющей размещение предметов на объектах, схемы построения возможных (допустимых) способов размещения, цели задачи - критерии эффективности при выборе способа размещения, а также ряда дополнительных требований к решению задачи.

Размерность, форма, характеристика размеров фигур и ориентация ее осей задают тип объекта или предмета раскроя. Конкретный геометрический объект определяется его типом и набором числовых параметров: углов, размеров, пропорций и пр., выбор которых дополняет тип до типоразмера. Типоразмер объекта установлен, если заданы все его параметры, и он характеризует множество конгруэнтных геометрических фигур на прямой, плоскости или в пространстве. На практике встречаются задачи раскроя единственного объекта, заданного количества объектов одного типоразмера, неизвестного количества объектов одного типоразмера или объектов некоторого множества типоразмеров.

Количество экземпляров объектов каждого вида может быть известным, произвольным или определяться границами.

Раскрой единственного объекта, который можно представить как последовательный процесс выкраивания предметов или деления этого объекта на части, из которых в дальнейшем будут получены заготовки, приводит к задачам построения оптимального плана раскроя. В оставшихся случаях при решении задач раскроя произвольного количества объектов обычно используется техника линейной оптимизации. На практике количество предметов одного типоразмера составляет несколько десятков и сотен.

В оптимизационных задачах важен критерий эффективности, который, в зависимости от условий задачи, можно связать с расходом материала в натуральном или стоимостном выражении, количествами выкроенных предметов (заготовок деталей) или суммарным доходом от их реализации. Чаще всего таковым является некоторая линейная функция количества израсходованных объектов и полученных предметов раскроя.

Основное содержание прикладной задачи раскроя обычно дополнено рядом условий, включая требования:

- комплектности предметов, т.е. пропорциональности объемов их производства с поправкой на имеющиеся запасы;
- комплектности расходования объектов раскроя;
- массовости производства, суть которого альтернатива: не выкраивать предметы данного вида или выкраивать их количество, не меньшее установленной нижней границы;
- соблюдения определенных границ доли потерь материала;
- условий последовательной реализации процесса раскроя, примерами которых могут служить гильотинные резы или определенные требования к очередности выкраивания и форме остатка материала после каждого шага;
- ограничение на допустимое количество раскроев в оптимальном плане.

Дополнительные условия по-разному влияют на вид математической модели, сложность алгоритма и трудоемкость решения задачи раскроя. В некоторых случаях количество вариантов планов раскроя сокращается, и задача становится проще, иногда существенно не меняя алгоритм, его удается приспособить для решения модифицированной задачи. Однако чаще дополнительные ограничения усложняют решение задачи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСКРОЯ ГОФРОПОЛОТНА

При производстве изделий из гофрокартона предметы раскроя - прямоугольники заданных размеров, а объект раскроя - полотно - полоса, длину которой можно считать бесконечной. Задачу планирования раскроя гофрополотна определим следующим образом. Определено множество заготовок M с заданными размерами и требуемыми границами выпуска b_i и B_i – минимально и максимально допустимые объемы (m^2). Необходимо раскроить как можно больше заготовок, используя раскрой с наименьшим средним процентом потерь и учитывая ряд технологических ограничений. Обозначим N – множество возможных раскроев для гофроагрегата. На основании минимальной необходимой загрузки и максимальной возможной скорости работы для гофроагрегата введем ограничения на объемы выпуска d и D (m^2).

При перенастройке гофроагрегата на новый раскрой некоторая часть гофрополотна идет в отходы, так как агрегат не останавливается, поэтому выпуск раскроев небольших по объему не экономичен (потери, связанные с переходом на новый раскрой, будут больше, чем выгода, получаемая при его выпуске). Поэтому введем параметр $minV$ – минимальный допустимый объем раскроя для выпуска.

Обозначим x_j – планируемая выработка гофрополотна (m^2) в соответствии с раскроем $j \in N$. Решением задачи является список раскроев $j \in N$ с указанием объема реализации x_j каждого из них. Каждому раскрою соответствует процент потерь δ_j и нормативы выработки заготовок A_{ij} (количество m^2 заготовок $i \in M$ при раскросе квадратного метра гофрополотна по схеме $j \in N$).

Целевая функция задачи определяется суммарными потерями материала:

$$\sum_{j \in N} \delta_j x_j \rightarrow \min. \quad (1)$$

Основные условия задачи ограничивают объемы производства заготовок:

$$b_i \leq \sum_{j \in N} A_{ij} x_j \leq B_i, \quad i \in M. \quad (2)$$

Их дополняют условия массовости объема выработки раскроя:

$$x_j \in 0 \cup [\min V, \infty), \quad j \in N, \quad (3)$$

раскрой либо не используется в оптимальном плане ($x_j = 0$), либо он включен в план и объем его выработки не менее $\min V$.

Требования на объемы выработки гофроагрегатом накладывают следующее ограничение:

$$d \leq \sum_{j \in N} x_j \leq D. \quad (4)$$

Для решения задачи (1) – (4) успешно используются методы исследования операций и математического программирования. Можно предложить следующие алгоритмы поиска оптимального ответа:

1) *Полный перебор возможных раскроев с использованием «жадных» алгоритмов.*

На первом шаге выбираются раскрои, состоящие из одной заготовки, которую можно несколькими полосами поместить по ширине гофрополотна так, чтобы обрезаемая кромка находилась в установленных границах. Далее перебираются все раскрои, состоящие из двух разных по ширине заготовок, при этом заготовки, которые были выбраны на первом шаге, не учитываются. Каждой заготовке соответствует не менее чем одна полоса на гофрополотне, причем суммарная ширина этих полос должна соответствовать границам по обрезаемой кромке. Раскрои из двух заготовок, удовлетворяющие технологическим ограничениям, сортируются по возрастанию процента потерь, после чего из этого списка последовательно выбираются раскрои для обеспечения максимально возможного выпуска изделий. Основным преимуществом данного метода является простота реализации. К недостаткам можно отнести ограниченный набор раскроев, который содержит лишь малую часть технологически возможных и, как следствие, неполное соответствие полученного решения реальной производственной ситуации.

2) *Предварительное построение возможных раскроев и выбор плана с использованием линейной оптимизации.*

На первом шаге строятся все технологически возможные раскрои, которые заносятся в симплексную таблицу. Для построения возможных раскроев используются алгоритмы полного перебора. На следующем шаге используются алгоритмы линейной оптимизации для выбора оптимального набора раскроев. В отличие от первого метода, полученное решение обычно полностью соответствует требованиям технолога и реализуется без корректировки. Основным недостатком данного метода - необходимость построения полной таблицы всех возможных раскроев, так как большое количество раскроев затрудняет их хранение и негативно сказывается на времени вычислений.

3) *Динамическое формирование требуемых раскроев при выборе плана с использованием линейной оптимизации.*

В этом алгоритме для решения поставленной задачи используется модифицированный симплексный метод и метод генерации столбцов. Множество переменных, которые при поиске оптимального плана входят в состав базисных - малая часть теоретически возможных планов раскроя, остальные хранятся и пересчитываются напрасно. Этот недостаток устраняется применением метода генерации столбцов. На каждой итерации симплексного метода решается вспомогательная задача линейного раскроя для поиска нового водимого в базис столбца. Использование барьеров при оценке стоимости раскроя позволяет отсеять множество раскроев, невыгодных на данном шаге. Решение вспомогательной задачи либо подтверждает оптимальность текущего плана, либо указывает раскрой, использование которого «улучшает» его. Столбцы симплексной таблицы

рассчитываются не перед началом решения задачи, а по мере надобности, в процессе решения основной задачи ЛП.

ЗАДАЧА С ОГРАНИЧЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ИТоговых РАСКРОЕв

В процессе внедрения систем, направленных на решение задач оптимального раскроя гофропалатки, часто возникают другие ограничения, которые выходят за рамки класса задач линейного программирования. К примеру, операция перенастройки оборудования может быть довольно трудоемкой и длительной, поэтому возникает потребность в ограничении количества планируемых раскроев. При этом сокращение количества перенастроек оборудования нередко позволяет уменьшить количество отходов за счет снижения потерь при переналадке, несмотря на использование менее эффективных схем раскроя.

Для учета ограничения на количество раскроев в оптимальном плане (не более **IV**) необходимо добавить следующее условие:

$$\sum_{j \in N} \text{sign}(x_j) \leq K \tag{5}$$

Указанное ограничение приводит к новой задаче, которую назовем задачей линейного программирования с ограниченным количеством базисных переменных (задача ЛП с ОКБП).

Рассмотрим произвольную задачу ЛП **P** типа задачи формирования оптимального плана раскроев с множеством $M = 1..m$ ограничений, $N = 1..n$ переменных, матрицей $A (m \times n)$ ограничений и векторами $b \geq 0, c \geq 0, x$ соответствующей размерности

$$\begin{aligned} P: \quad & c x \rightarrow \min; \\ & A x \geq b; \\ & x \geq 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Следуя содержанию задачи, коэффициенты матрицы $A_{ij} \geq 0$, следовательно, можно ограничиться случаем $b_i > 0$ для каждого $i \in M$. Будем также считать, что ограничения задачи (6) совместны, x^* - ее оптимальное решение, а $z^* = c x^*$. Сделаем еще одно важное предположение. Чтобы избежать оговорок, будем считать, что матрица ограничений этой задачи не вырождена и имеет полный ранг. Каноническая форма этой задачи такова:

$$\begin{aligned} & c x + 0 y \rightarrow \min; \\ & A x - E y = b; \\ & x, y \geq 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Множество переменных задачи (6) составляет $N'' = N' + M$, базисных переменных $N' \subset N''$, где $|N'| = m$. Среди переменных множества присутствуют как переменные основной задачи $N_x \subset N$ (основные базисные столбцы), так и орты $N_y \subset M$ (дополнительные базисные столбцы), $N' = N_x + N_y$. В силу предположения о невырожденности всех базисных решений задачи $x[N_x], y[N_y] > 0$ для любого базисного множества N' . Важная особенность - целевая функция рассматриваемой задачи обязательно ограничена (снизу).

Цель данного исследования - поиск оптимального плана (x^*, y^*) этой задачи с дополнительным условием

$$|N'| \leq k < m, \tag{8}$$

которому соответствует оптимальное значение целевой функции z^* . Полученную задачу обозначим P_k . Задачу (6) или (7) будем называть базовой по отношению к данной задаче ОКБП, число k - рангом базиса задачи. Следует оговорить некоторую условность в названии класса рассматриваемых задач - ранг матрицы определяет лишь $|N_x|$ - количество основных столбцов матрицы ограничений, общее количество базисных переменных (основных столбцов N_x и N_y), разумеется, всегда составляет m .

Отметим, что если $|N_{x^*}| \leq k$, то решение P_k совпадает с решением P . Сложности возникают в случае $|N_{x^*}| > k$. Отметим некоторые особенности рассматриваемой задачи.

• В основе рассматриваемой задачи понятие базисного плана задачи ЛП, что фактически исключает возможность ее решения без использования средств линейной алгебры и линейного программирования. С другой стороны, исследование базисных решений этой задачи привносит в ее содержание элемент дискретности (количество базисных множеств не превосходит 2^n), который удобно использовать для организации алгоритмов частичного перебора.

• Для любой задачи ЛП (6) или (7) имеется целое k_0 , такое, что рассматриваемая задача имеет допустимое решение только для $k \geq k_0$. Таким образом, необходимо рассматривать подмножества $N_x \subset N$, для которых $k_0 \leq |N_x| \leq k$, что принципиально противоречит концепции независимого множества матроида. В связи с этим необходима определенная, представленная далее корректировка условий этой задачи.

• Оптимальное значение целевой функции решения задачи с ОКБП является компромиссом между качеством решения базовой задачи ЛП и рангом задачи. С этой точки зрения рассматриваемая задача является двухцелевой с противоречивыми функциями цели. Ограничение количества основных столбцов практически неизбежно приводит к снижению возможностей выбора плана и, тем самым, к увеличению числа дополнительных переменных y , векторная природа которых приводит к появлению целой серии задач оптимизации с различными критериями эффективности и дополнительными ограничениями, среди которых:

1. Задача ОКБП по критерию наименьшего суммарного перевыполнения заданий

$$\sum_{i \in M} y_i \rightarrow \min .$$

2. Задача ОКБП с ограниченным суммарным перевыполнением заданий

$$\sum_{i \in M} y_i \leq d .$$

3. Задача ОКБП с ограничениями размеров перевыполнения заданий

$$0 \leq y_i \leq d_i, \quad i \in M .$$

4. Задача ОКБП по критерию наименьшего суммарного взвешенного перевыполнения заданий

$$\sum_{i \in M} \delta_i y_i \rightarrow \min .$$

5. Минимаксная задача ОКБП

$$\max\{ y_i / i \in M \} \rightarrow \min .$$

6. Задача ОКБП с комбинированным критерием, например:

$$\sum_{j \in N} c_j x_j + \sum_{i \in M} \delta_i y_i \rightarrow \min$$

и произвольным дополнительным набором ограничений.

7. Задача ОКБП с критериями эффективности и ограничениями, подобными представленным, для некоторого подмножества $M' \subset M$ дополнительных переменных.

Все перечисленные задачи могут иметь практическое приложение. Поскольку все эти задачи без условия ОКБП сводятся к линейным задачам, теория, рассматриваемая далее, может быть применена и к этим задачам.

Теорема 1. Задача P_k разрешима при $k \geq k_0$, где k_0 - оптимальное значение целевой функции в задаче о покрытии:

$$P' : \quad k_0 = \sum_{j \in N} x_j \rightarrow \min,$$

$$\sum_{j \in N} B_{ij} x_j \geq 1, \quad i \in M,$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j \in N,$$

где $B_{ij} = \text{sign}(A_{ij})$.

Для доказательства теоремы отметим, что если x^* - оптимальное решение задачи P' , то βx^* - допустимое решение задачи (6), базисное множество которой составляет $|N_x| = k_0$ элементов, а $\beta = \max\{b_i / i \in M\}$.

Решение чисто дискретной задачи о покрытии существенно проще решения исходной задачи, соответствующие методы хорошо известны. Однако наличие вспомогательной NP задачи является грустным диагнозом для исходной.

Следствие. Рассматриваемая задача относится к классу NP задач.

Изучение следующих свойств приводит к исследованию однородных матроидов множеств. Условие допустимости непосредственно указывает на матроидную структуру совокупности рассматриваемых множеств, а желание получить эффективный алгоритм решения (или, хотя бы оценки решения задачи) является основанием для рассмотрения соответствующего матроида множеств. Введем такие матроиды.

Обозначим $M' = \langle N, J \rangle$ однородный матроид ранга k , множество элементов которого N , а семейство независимых множеств $J = \langle A \in 2^N \mid |A| \leq k \rangle$ определяет допустимые множества N_x . Множество баз B данного матроида составляют k -элементные подмножества N , множество циклов - $k+1$ -элементные подмножества.

Введем также двойственный матроид по отношению к рассматриваемому $M'' = \langle N, J' \rangle$ с семейством независимых множеств $J' = \langle A \in 2^N \mid |A| > k \rangle$. Независимые множества двойственного матроида (кроме баз) соответствуют недопустимым решениям задачи.

Множество C_n^k баз каждого из этих матроидов составляют k -элементные подмножества N . Матроидная структура накладывается на множество допустимых решений задачи (7) с дополнительным условием (8).

Для некоторого k рассматриваемая задача может не иметь допустимого решения. Чтобы избавиться от этой проблемы, расширим множество столбцов задачи вектором b , которому сопоставим искусственную переменную w . Теперь задача

$$\begin{aligned} Gw + cx + 0y &\rightarrow \min; \\ bw + Ax - Ey &= b; \\ w, x, y &\geq 0, \quad |N'| \leq k \end{aligned} \tag{9}$$

обязательно имеет решение для каждого k . В случае выбора достаточно большого весового коэффициента G данная и исходная задачи эквивалентны. Оценку величины G дает следующая теорема.

Теорема 2. Задача (9) эквивалентна задаче (6) при любом $k \geq k_0$ в случае

$$G > \underline{G} = \max\{c_j \mid j \in N\} \sum_{i \in M} \frac{b_i}{\min\{A_{ij} \mid A_{ij} > 0, j \in N\}}$$

Зафиксируем подходящее значение G .

Поиск эффективного (в идеале – «жадного») алгоритма решения данной задачи означает наличие структуры матроида, связанного с ней. К сожалению, комбинаторная природа задачи не позволяет рассчитывать на эффективные алгоритмы ее решения, поскольку функционал не является аддитивным. Тем не менее, матроидная структура позволяет получить достаточно эффективную оценку функционала задачи.

В характеристике алгоритма важнейшую роль играет так называемый *пробный план* - базисное множество, которое характеризует состояние алгоритма и задает определенное подмножество решений задачи. С любым независимым множеством логично связать совокупность всех независимых множеств, содержащих его. В рамках исследования все алгоритмы решения задачи P являются:

- Прямыми или двойственными - в зависимости от матроида, в состав независимых множеств которого входит текущий пробный план.
- Точными или приближенными (более конкретно, переборными или «жадными») методами.

Автором предложены следующие алгоритмы решения задач ОКБП:

- Прямые переборные алгоритмы.
 - Последовательный анализ независимых множеств (алгоритм А1). Для каждого $A \in J$ решить задачу ЛП и выбрать наилучшее решение.
 - Последовательный анализ баз матроида (А2). Для каждого $A \in B$ решить задачу ЛП и выбрать наилучшее решение.

– Перебор дополнений циклов двойственного матроида (A3). Для каждого $A \in J$, $|A| = k-1$ решить задачу P_A , после чего выполнить единственный шаг симплексного метода, дополнив множество столбцов матрицы ограничений всеми оставшимися раскрыями.

Подход, основанный на переборе подмножеств, может использоваться при решении задач очень малой размерности, но абсолютно неприменим при использовании метода генерации столбцов, размерность множества в котором практически неограниченна.

• *Прямые приближенные алгоритмы*

– Приближенный алгоритм (A4). На предварительном этапе этого алгоритма решением задачи (7) находится базисное решение $N = N_x^* + N_y^*$, а в процессе перебора множество заменяется на существенно меньшее $N^* \subset N$.

– «Жадный» прямой алгоритм (A5). Формируется начальный план, а затем, при решении задачи симплекс-методом, как только вводимый элемент нарушает ограничение по количеству элементов в базисе, происходит остановка.

На практике хороший результат показывает приближенный, не гарантирующий оптимальность полученного плана, алгоритм A4, аналогичный A2.

• *Двойственные алгоритмы*

Двойственными алгоритмами назовем методы, в которых базисные множества столбцов N_x пробных планов являются независимыми множествами двойственного однородного матроида ранга $n-k$.

Если при исследовании прямых алгоритмов основой перебора является $N_x = 0$, то за основу двойственных логично принять $N_x = N_x^*$ – оптимальное решение задачи (6) без ОКБП.

– Алгоритм последовательного отсева (D1). После решения основной задачи, на каждом следующем шаге из базисного множества исключаются элементы с наименьшими оценками, до тех пор, пока их количество не станет равным k .

– Метод фронтального перебора (D2).

– Начальный шаг субоптимального алгоритма (D3).

Алгоритм D2 состоит из следующих шагов:

Шаг 0. Определить $N_0 = N$.

Шаг 1. Положить значение уровня $s=0$, определить список $List_0 = \{0\}$, а также положить $z_{rec} = G$ (что эквивалентно решению задачи P_0).

Шаг 2. Последовательно все множества $N' \in List_s$ пополнить дополнительным элементом $i \in N_0 \setminus N'$, дорешивая задачу $P_{N'+\{i\}}$. Если $z_{N'+\{i\}} < z_{N'}$, включить множество $N'+\{i\}$ вместе с оценкой функции цели $z_{N'+\{i\}}$ в список $List_{s+1}$, иначе это множество отсеивается. Попутно сравнивать $z_{N'+\{i\}}$ и z_{rec} , обновляя полученный рекорд и сохраняя рекордный план x_{rec} .

Шаг 3. Если $List_{s+1} \neq 0$, присвоить $s = s+1$ и перейти к Шагу 2.

Шаг 4. Получить оптимальный план исходной задачи x_{rec} и соответствующее ему значение функции цели z_{rec} .

Наиболее удачным при практическом использовании оказался алгоритм D3, который отличается от D2 только начальным шагом:

Шаг 0. Решить ослабленную задачу ЛП без условия ОКБП, получив базисный оптимальный план x^* на базисном множестве N^* . Положить $N_0 = N^*$.

Эффективность описанных в данной статье методов подтверждается опытом использования их в составе программных комплексов реализованных на ряде предприятиях ЦБП России и Украины. Составленные планы раскроев и производства продукции обеспечивают значительное снижение потерь материала, за счет выбора рациональных вариантов раскроя гофроплат и их сочетаний.

Сошкин Роман Владимирович

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск
Преподаватель кафедры «Прикладная математика и кибернетика»
185019, Петрозаводск, ул. Сыктывкарская, 29-67,
Телефоны: (8142) 57 21 40, +79114067026,
E-mail: soshkin@gmail.com

ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ У КРАЯ ТРЕЩИНЫ, ВЫХОДЯЩЕЙ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА СРЕД

Рассматривается плоская задача о предельном равновесии трещины-расслоения на границе раздела различных материалов. Используется условие предельной вытяжки на краю концевой зоны. Полученные формулы для компонент вектора раскрытия берегов трещины, а также соотношения между внешней нагрузкой длиной трещины и параметрами концевой зоны в состоянии предельного равновесия.

The plane problem about limiting balance of a crack-stratification on boundary of section of various materials is considered. The condition from the appearance of a crack is formulated taking account of the criterion of a limit tractions of the bonds in the materials. The received formulas for a component of a vector of disclosing of faces of a crack, and also a parity between external loading in length of a crack and parameters of a end zone in a condition of limiting balance.

Рассмотрим задачу о распределении напряжений и деформаций вблизи края трещины, возникающей на границе раздела двух однородных изотропных полуплоскостей с различными упругими постоянными.

Принято, что при действии внешних нагрузок взаимодействие между поверхностями в концевых зонах трещины характеризуется постоянными нормальными и касательными напряжениями сцепления. Это позволяет моделировать пластическое течение в промежуточном адгезионном слое в концевых зонах трещины. Как известно, в однородных телах гипотеза о тонкой пластической области в конце трещины хорошо описывает процессы развития трещины в условиях плоского напряженного состояния (тонких пластинах), в случае кусочно-однородного тела при малой в сравнении с длиной трещины толщине адгезионного слоя пластические области могут быть локализованы в пределах него также в условиях плоской деформации. Это всегда имеет место, если адгезионный слой более пластичен, чем соединенные им материалы. Асимптотическое решение такой задачи возможно, оно основано на представлении о тонкой структуре конца трещины.

Рассмотрим окрестность конца трещины, которая мала по сравнению с характерным линейным размером L в плане тела, но больше сравнительно с характерным размером концевой области трещины.

Тогда трещина на плоскости Oxy представится полубесконечным разрезом вдоль $y = 0$, $-\infty < x < 0$ свободным от внешних напряжений. При этом в части разреза длиной d (концевая зона), примыкающая к ее вершине, на берегах трещины, действуют постоянные нормальные σ_* и касательные τ_* напряжения сцепления между берегами трещины, отвечающие пластическому течению в тонком переходном слое. Пусть эти напряжения будут удовлетворять некоторому условию пластичности

$$f(\sigma_*, \tau_*) = 0, \quad (1)$$

где f – монотонно возрастающая функция от абсолютных значений σ_* и τ_* , зависящая от свойств материала адгезионного слоя

Условие ограниченности напряжений у вершины трещины при $x = 0$ дает второе соотношение для определения значений σ_* и τ_* .

На бесконечности реализуется напряженное поле, характерное для тонкой структуры конца трещины. Это поле считается заданным и имеет следующий вид [1]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x = & \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[3\cos\frac{\theta}{2} - 2\beta\sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} - \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] - \right. \\
 & \left. - e^{\beta(\theta-\pi)} \cos\frac{\theta}{2} \right\} - \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[-3\sin\frac{\theta}{2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} - 2\beta\sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] \right\}, \\
 \sigma_y = & \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[\cos\frac{\theta}{2} + 2\beta\sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} + \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] + e^{\beta(\theta-\pi)} \right\} - \\
 & - \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[\sin\frac{\theta}{2} - \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} + 2\beta\sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] \right\}, \\
 \tau_{xy} = & \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[\sin\frac{\theta}{2} + \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} - 2\beta\sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] - \right. \\
 & \left. - e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} \right\} - \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{\beta(\theta-\pi)} \cos\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[-\cos\frac{\theta}{2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} + 2\beta\sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} \right] \right\},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где r, θ - полярная система координат;

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{G_1 + \kappa_1 G_2}{G_2 + \kappa_2 G_1};$$

G_1 и G_2 - модули сдвига материалов; $\kappa_1 = 3 - 4\mu_1$; $\kappa_2 = 3 - 4\mu_2$; μ_1 и μ_2 - коэффициенты Пуассона материалов.

В поставленной задаче параметрами нагружения являются коэффициенты интенсивности напряжений K_I^∞ , K_{II}^∞ , представляющие собой некоторые функции формы тела, граничных условий. Они определяются из решения задачи «в целом».

Граничные условия на берегах трещины будут

$$\sigma_y = \begin{cases} 0 & -\infty < x < -d \\ \sigma_* & -d \leq x \leq 0 \end{cases} \quad \tau_{xy} = \begin{cases} 0 & -\infty < x < -d \\ \tau_* & -d \leq x \leq 0 \end{cases} \tag{3}$$

Суммарные коэффициенты интенсивности напряжения от действия внешней нагрузки и внутренних напряжений сцепления в концевой зоне трещины будут иметь следующий вид

$$K_I + iK_{II} = K_I^\infty + iK_{II}^\infty - 2^{3/2+i\beta} \frac{(1+2i\beta)ch\pi\beta}{(1+4\beta^2)2^{i\beta}\sqrt{\pi}} d^{1/2-i\beta} \rho^{1/2-i\beta} (\sigma_* + i\tau_*) \tag{4}$$

Рассмотрим предельное состояние трещины с концевой зоной на границе раздела сред. Будем считать, что усилия взаимодействия берегов трещины (силы сцепления) в концевой зоне трещины распределены так (максимально возможная интенсивность сил сцепления), что суммарный коэффициент интенсивности напряжений, определяемый как разность между коэффициентами интенсивности напряжений от действия внешних нагрузок и коэффициентами интенсивности напряжений от сил сцепления, равен нулю.

Приравнивая выражение (4) к нулю, получим уравнение, связывающее параметры нагружения, напряжения сцепления, длину и размер концевой зоны трещины в состоянии предельного равновесия

$$\sigma_* + i\tau_* = (K_I^\infty + iK_{II}^\infty) \left\{ \frac{(1 + 4\beta^2) 2^{i\beta} \sqrt{\pi} (d\ell)^{-1/2+i\beta} 2^{-3/2-i\beta}}{(1 + 2i\beta) ch\pi\beta} \right\} \quad (5)$$

Для компонент раскрытия берегов трещины на краю концевой зоны при $x = 1 - d$, найдем

$$\begin{aligned} & v^+(1-d) - v^-(1-d) - i[u^+(1-d) - u^-(1-d)] = \\ & = \gamma \left[\frac{\sqrt{d/2} (d/2)^{-i\beta} 2^{i\beta} \ell^{-1/2+i\beta}}{2\sqrt{\pi} ch\pi\beta (1 + 2i\beta)} (K_I^\infty + iK_{II}^\infty) - \frac{d}{2\pi(1 + 2i\beta)} (\sigma_* - i\tau_*) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Используя формулу (5), находим

$$v^+(1-d) - v^-(1-d) - i[u^+(1-d) - u^-(1-d)] = \frac{\gamma d (1 + 2i\beta)}{2\pi (1 + 4\beta^2)} (\sigma_* - i\tau_*) \quad (7)$$

Для оценки размера концевой зоны d используем условие предельной вытяжки на краю концевой области. Используем безразмерную величину $\delta' = \delta_c / \ell$ (в дальнейшем штрих опущен)

$$|(v^+ - v^-) - i(u^+ - u^-)| = \delta_c \quad (8)$$

где δ_c - постоянная, характеризующая материал переходного (адгезионного) слоя.

Используя условие (8) предельной вытяжки, для размера концевой зоны получим

$$d = \frac{2\pi \sqrt{1 + 4\beta^2}}{\gamma \sqrt{\sigma_*^2 + \tau_*^2}} \delta_c \quad (9)$$

В состоянии предельного равновесия справедливо [1] равенство

$$G_b = G_n, \quad (10)$$

где G_b - скорость высвобождения упругой энергии при продвижении вершины трещины, G_n - критическая величина скорости поглощения энергии в вершине трещины.

Для скорости высвобождения упругой энергии при продвижении трещины имеем

$$G_b = \frac{\gamma K^2}{16ch^2\pi\beta}, \quad (11)$$

где $K^2 = (K_I^\infty)^2 + (K_{II}^\infty)^2$ - квадрат модуля коэффициента интенсивности напряжений, обусловленного действием параметров нагружения.

Критическая величина скорости поглощения энергии в вершине трещины определяется формулой

$$G_n = \frac{\gamma K_*^2}{16ch^2\pi\beta}, \quad (12)$$

где $K_*^2 = (K_I^c)^2 + (K_{II}^c)^2$ - квадрат модуля коэффициента интенсивности напряжений, вызванного напряжениями сцепления, действующими в концевой зоне трещины в состоянии предельного равновесия.

Из соотношения (4) имеем

$$K_*^2 = \frac{8ch^2\pi\beta}{\pi(1+4\beta^2)}(\sigma_*^2 + \tau_*^2)\ell d \quad (13)$$

Для критической величины скорости потребления энергии находим

$$G_n = \frac{\gamma}{2\pi(1+4\beta^2)}(\sigma_*^2 + \tau_*^2)\ell d$$

Теперь в случае предельной вытяжки с помощью формул (12) и (13) получаем соотношение

$$G_n = \sqrt{\frac{\sigma_*^2 + \tau_*^2}{1+4\beta^2}} \delta_c \ell, \quad (14)$$

которое связывает критическую величину скорости потребления энергии с напряжениями, действующими в концевой зоне, и с предельной вытяжкой.

Полученные соотношения дают возможность (при заданной длине трещины и характеристиках материала в концевой зоне) найти критическую нагрузку и размер концевой зоны для предельно-равновесного состояния вершины трещины и края концевой зоны.

Скорость потребления энергии $G_n(d, \ell)$ найденная из этого решения, является энергетической характеристикой сопротивления разрушению (адгезионная энергия разрушения).

Напомним, что K_I^∞ и K_{II}^∞ описывают поле напряжений на расстояниях от конца трещины, больших по сравнению с размерами концевой зоны.

При постановке сингулярной канонической задачи считалось, что $r \ll L$, откуда вытекает [1] необходимое условие корректности рассматриваемой задачи

$$1 \gg e^{-1/|\beta|}, \quad (15)$$

налагающее ограничения на значения физических параметров двухслойного тела.

Простой анализ выражения (15) для β показывает, что максимум $|\beta|$ в случае плоской деформации равен $\ln 3/2\pi$, т.е. $\exp(-1/|\beta|) \leq 0,0007$, что гораздо меньше 1. Таким образом, решение задачи имеет физический смысл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст]/ Г.П. Черепанов. - М.: Наука, 1974. 640 с.

Гасанов Шахин Гумбат оглы

Бакинский филиал Московского государственного открытого университета

Кандидат технических наук, доцент

AZ1129, г. Баку, ул. Н. Туси, д. 14, кв. 63, тел.: (+99450) 327-07-25

E-mail: irakon63@hotmail.com

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.5.012.14:004.942

И.С. КОНСТАНТИНОВ, И.В. БИЗИН

**МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ФАНТОМА НА ОСНОВЕ
ТРЕХМЕРНОГО ЭТАЛОНА В АСНИ
МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТОМОГРАММ**

В статье представлена математическая модель для эмуляции проекционных данных, получаемых с томографа, на основе трехмерного эталона, с учетом геометрических и случайных погрешностей. Сформированные данные используются для тестирования методов реконструкции томограмм в АСНИ.

This article describes the model for simulation a projection data like on real projection data from tomograph with geometric and stochastic errors for testing reconstruction methods. In the model there is 3D-etalon of research object for simulating not normal angle from scanner plane in automatic systems of science research.

При исследовании методов реконструкции томограмм необходимо иметь возможность проводить вычислительный эксперимент не только с совокупностью проекций (фантомом), полученным с экспериментальной установки, но и формировать фантом из эталонного изображения как можно ближе к реальным условиям. В связи с общей некорректностью задач томографии [1] различные методы реконструкции могут давать разные результаты в зависимости от погрешностей и искажений проекционных данных. Поэтому значимые факторы, вносящие искажения в фантом, должны быть учтены при компьютерном моделировании томографа.

Схематично процесс сканирования объекта изображен на рис. 1. Разработанная модель формирования фантома включает не только идеальное преобразование, дающее интегральные проекции, но и учитывает факторы, обусловленные технологическими особенностями конструкции экспериментальной установки: люфт источников и детекторов, а также отклонение оси вращения от нормали к плоскости сканирования.

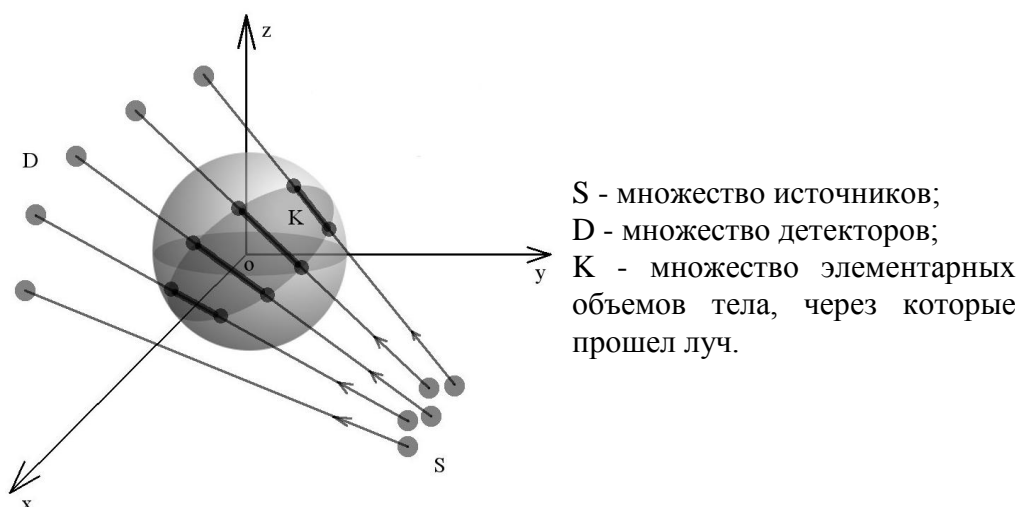


Рисунок 1 – Схема сканирования объекта

При учете отклонения оси вращения от нормали к плоскости сканирования используется трехмерный эталон, который можно получить, строя различные модели реальных объектов. В частности, для формирования трехмерного эталона сосудистой и нервной систем можно воспользоваться математическим аппаратом фракталов, после чего представить полученные данные в виде трехмерного растра линейных коэффициентов ослабления излучения.

Разработанная математическая модель формирования фантома включает задание тела объекта, источников и детекторов излучения, а также организацию процесса сканирования с учетом случайных и геометрических погрешностей.

Зададим тело объекта множеством $M \subset \mathbb{R}_+^1$:

$$M = \{\mu_l(x_l, y_l, z_l)\},$$

где \mathbb{R}_+^1 – множество действительных положительных чисел;

l – порядковый номер элементов множества M , изменяющийся от 1 до максимального порядкового номера l_M .

μ_l – линейный коэффициент ослабления излучения в соответствующем элементарном объеме тела (V_l), вписанного в единичный шар, расположенный в центре неподвижной системы координат. Каждый элементарный объем V_l описывается вектором (x_l, y_l, z_l) , т. е. для исследуемого объекта:

$$\forall x_l, y_l, z_l, (l = 1, 2, \dots, l_M \in \mathbb{N}): x_l^2 + y_l^2 + z_l^2 < 1,$$

где \mathbb{N} – множество натуральных чисел;

Задание источников излучения: $S = \{s_{ij}\} \subset \mathbb{R}_+^1$,

где s_{ij} – интенсивность излучения j -ого источника в точке пространства (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, i_s \in \mathbb{N}, j = 1, 2, \dots, j_{s_i} \in \mathbb{N}$, i_s – кол-во точек пространства в которых находятся источники, j_{s_i} – кол-во источников в точке пространства (x_i, y_i, z_i) , при этом $\forall j$ выполнимо $s_{ij}(x_i, y_i, z_i) = I_0^{s_i}$.

Источники излучения находятся вне объемов тела с удовлетворением условий $\forall x_i, y_i, z_i, (i = 1, 2, \dots, i_s \in \mathbb{N}): x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \geq 1$.

Задание приемников (детекторов) излучения: $D = \{d_{ij}\} \subset \mathbb{R}_+^1$

d_{ij} – интенсивность излучения, приходящего на датчик, расположенный в точке пространства (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) от j -ого источника s_{ij} , расположенного в точке пространства (x_i, y_i, z_i) .

Значения d_{ij} зависят от пути луча из источника излучения, проходящего через тело, определяющиеся зависимостью:

$$d_{ij} = s_{ij} \cdot e^{\sum_{k \in K_{ij}} \mu_k^{ij}},$$

где K_{ij} – совокупность элементарных объемов тела, поглощающих энергию излучения от j -го источника, находящегося в i -ой точке и принимающихся d_{ij} детектором.

Процесс сканирования предназначен для формирования фантома как совокупности проекций. Каждая последующая проекция является результатом поворота системы «источник-детектор» на заранее определенный угол, а фантом представляется двухмерной матрицей действительных положительных чисел, в которой каждая строка есть результат сканирования на конкретном угле поворота системы «источник-детектор».

A – множество углов поворота сканирующей системы: $A = \{\alpha_t\} \subset \mathbb{R}_+^1$,

где α_t – угол поворота, на который необходимо повернуть систему «источник-детектор» для получения t -ой строки фантома, причем:

$$\forall \alpha_t, (t = 1, 2, \dots, t_A \in \mathbb{N}): 0 \leq \alpha_t < 2\pi$$

Прежде чем получить строку фантома, необходимо учесть отклонение оси вращения объекта от нормали к плоскости распространения излучения, а также случайные колебания узла датчиков и узла источников.

Геометрические погрешности, вызванные отклонением оси вращения объекта от нормали к плоскости распространения излучения, для каждого источника и детектора можно учесть, пересчитав координаты следующим образом:

$$\begin{aligned} x_i^{\varepsilon\alpha_t} &= x_i \cos \gamma^{\alpha_t} - y_i \sin \varphi^{\alpha_t} \cos \gamma^{\alpha_t} - z_i \cos \varphi^{\alpha_t} \sin \gamma^{\alpha_t}, \\ y_i^{\varepsilon\alpha_t} &= y_i \cos \varphi^{\alpha_t} - z_i \sin \varphi^{\alpha_t}, \\ z_i^{\varepsilon\alpha_t} &= x_i \sin \gamma^{\alpha_t} + y_i \sin \varphi^{\alpha_t} \cos \gamma^{\alpha_t} + z_i \cos \varphi^{\alpha_t} \cos \gamma^{\alpha_t}, \end{aligned}$$

где φ^{α_t} – угол отклонения оси вращения от нормали к плоскости распространения излучения относительно оси ox при проекции с поворотом на угол α_t ;

γ^{α_t} – угол отклонения оси вращения от нормали к плоскости распространения излучения относительно оси oy при проекции с поворотом на угол α_t ;

$$\varphi^{\alpha_t} = f_\varphi(\alpha_t), \quad \gamma^{\alpha_t} = f_\gamma(\alpha_t).$$

Случайные погрешности можно определить как случайный трехмерный вектор $\vec{\delta}$ с нормальным законом распределения, тогда случайные колебания узла датчиков и узла источников можно учесть, изменив координату каждого на величину отклонения:

$$\begin{aligned} s_{ij} &\left(x_i^{\alpha_t} + \Delta x^{S\alpha_t}, y_i^{\alpha_t} + \Delta y^{S\alpha_t}, z_i^{\alpha_t} + \Delta z^{S\alpha_t} \right), \\ d_{ij} &\left(x_i^{\alpha_t} + \Delta x^{D\alpha_t}, y_i^{\alpha_t} + \Delta y^{D\alpha_t}, z_i^{\alpha_t} + \Delta z^{D\alpha_t} \right). \end{aligned}$$

В связи с тем, что в большинстве случаев корреляцией координат случайного трехмерного вектора с нормальным распределением можно пренебречь, возьмем $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ как независимые нормально распределенные случайные величины отдельно для множества источников и множества детекторов, которые можно вычислить по методу Бокса-Мюллера:

$$\begin{aligned} \Delta x^{\alpha_t} &= \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(r_1^{\alpha_t})} \cdot \cos(2\pi \cdot r_2^{\alpha_t}), \\ \Delta y^{\alpha_t} &= \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(r_1^{\alpha_t})} \cdot \sin(2\pi \cdot r_2^{\alpha_t}), \\ \Delta z^{\alpha_t} &= \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(r_1^{\alpha_t})} \cdot \cos(2\pi \cdot r_3^{\alpha_t}), \end{aligned}$$

где $\Delta x^{\alpha_t}, \Delta y^{\alpha_t}, \Delta z^{\alpha_t}$ – случайные величины отклонения с нормальным законом распределения соответствующие углу α_t ;

σ – стандартное отклонение;

$r_1^{\alpha_t}, r_2^{\alpha_t}, r_3^{\alpha_t}$ – независимые случайные величины, равномерно распределённые на интервале $(0, 1]$, разыгранные для каждого угла α_t ;

Осуществляя поворот системы «источники-детекторы» вокруг оси oz на угол α_t получим:

$$\begin{aligned} x^{\alpha_t} &= x^{\varepsilon\alpha_t} \cos \alpha_t - y^{\varepsilon\alpha_t} \sin \alpha_t, \\ y^{\alpha_t} &= x^{\varepsilon\alpha_t} \sin \alpha_t + y^{\varepsilon\alpha_t} \cos \alpha_t. \end{aligned}$$

Представленная модель была реализована в автоматизированной системе научных исследований методов реконструкции томограмм. Пример артефактов, возникающих при геометрическом и стохастическом искажении проекционных данных, приведен на рис. 1 б, в, г. Для сравнения на рис. 1 а показана реконструкция изображения из идеальных (неискаженных) проекционных данных. Для иллюстрации выбрано геометрическое тело, сечения которого плоскостями, перпендикулярными оси oz , одинаковы.

На представленных изображениях заметен различный характер их искажений в зависимости от геометрических (рис. 1 б, г) и стохастических (рис. 1 в) погрешностей при формировании фантома. Реконструкция изображений проводилась распространенным методом обратных фильтрованных проекций с фильтрацией по Фурье. Реконструируя изображения из фантомов, сформированных при помощи представленной модели, можно оценить разрешающую способность томограммы, полученной тем или иным методом реконструкции, в зависимости от заданных искажений проекционных данных.

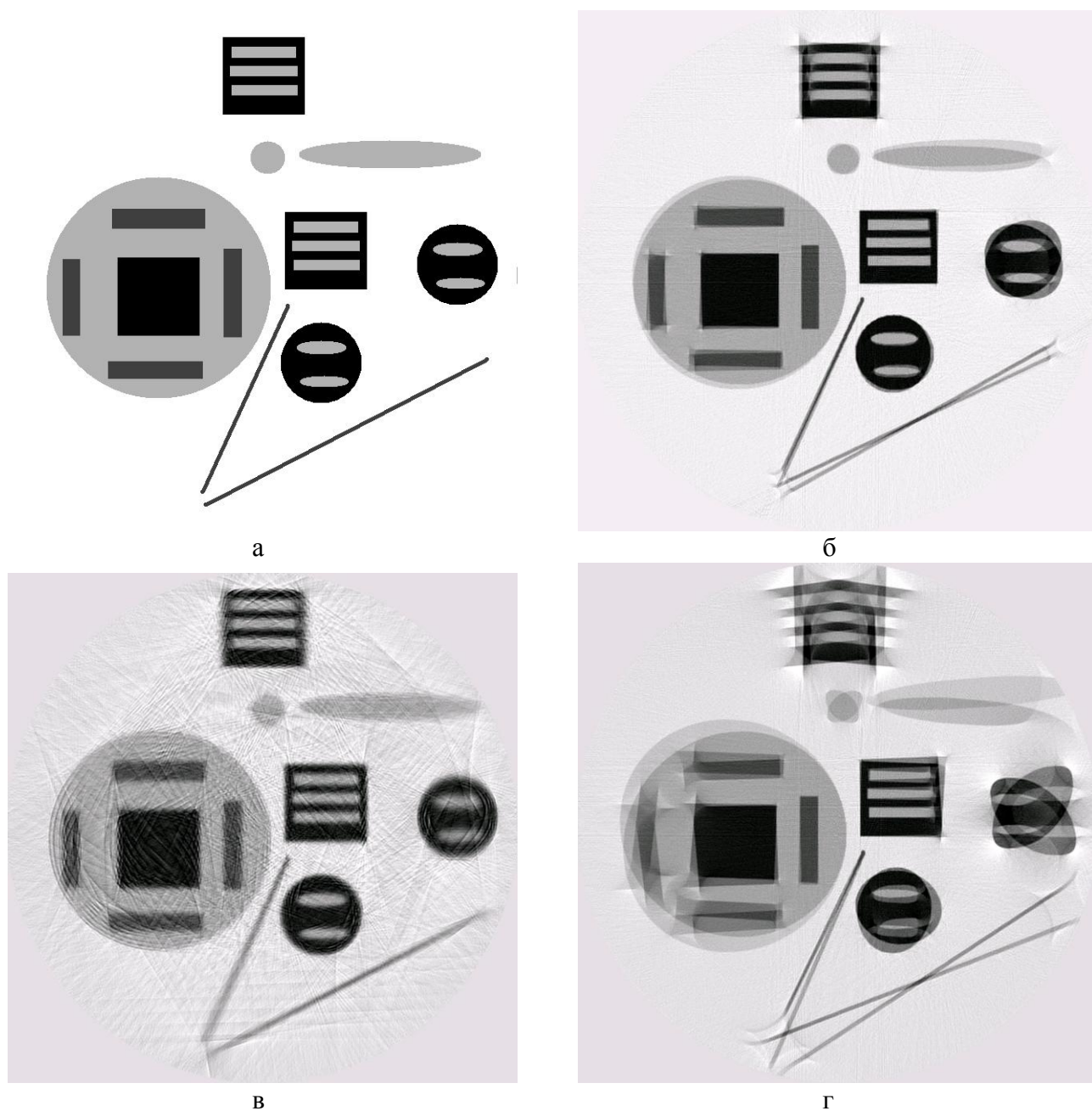


Рисунок 1 – Реконструированные изображения

а – без искажений; б – с отклонением оси вращения от нормали к плоскости сканирования на угол 5° ; г – на угол 10° ; в – со случайным нормальным отклонением датчиков и $\sigma = 10\text{мм}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Наттерер, Ф. Математические аспекты компьютерной томографии [Текст] : [пер. с англ.] / Ф. Наттерер. - М.: Мир, 1990.-288 с.,ил. - ISBN 5-03-001355-5
2. Терещенко, С.А. Методы вычислительной томографии [Текст] / С.А. Терещенко. - М.: Физматлит, 2004. - 320 с. : ил.
3. Троицкий, И. Н. Статистическая теория томографии [Текст] / И.Н. Троицкий. - М.: Радио и связь, 1989. - 240 с. : ил.
4. Kak, A.C. Principles of Computerized Tomographic Imaging [Text] / A. C. Kak, M. Slaney. - Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001.

Константинов Игорь Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Информационные системы», профессор
Тел. (4862) 40-96-14
E-mail: konstantinov@ostu.ru

Бизин Илья Валерьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Ассистент кафедры «Информационные системы»
Тел. (4862) 43-26-19
E-mail: bizin@yandex.ru

УДК 316.422.42:004

А.А. ПОЛЯКОВ

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЩЕСТВЕ

В статье описывается роль информационной инфраструктуры всех уровней управления бизнесом в обществе. Рассмотрены проблемы, возникающие из-за того, что базовые стандарты управления не учитывают информационно-телекоммуникационную структуру объекта управления.

This article describes the role of an information infrastructure of all levels of business management in a society. The problems, arising that base standards of management don't consider information-telecommunication structure of object of management, are considered here.

Становление информационного общества заставляет по-новому взглянуть на развитие экономики и человечества. Всё большее использование информационных технологий во всех сферах общественной и экономической деятельности коренным образом меняет подход к управлению, от функционального - к бизнес-ориентированному, кардинально меняется и роль самих информационных технологий. Первоначальная ориентация на управление на основе бизнес-процессов обеспечивала конкурентное преимущество для организации в условиях острейшей конкуренции, в настоящее время эффективное управление возможно только на основе интегрированных информационных, систем синхронизированных с управлением персоналом, сетевым менеджментом и обеспечивающих эффективное управление информацией как стратегическим бизнес-ресурсом; управление взаимоотношениями между информационными технологиями, информационными системами и бизнесом; разработку архитектуры информационной системы и IT-инфраструктуры организации; управление информационными системами на всех стадиях их жизненного цикла; организацию предприятий для производства и продвижения

информационных продуктов и услуг и управление их функционированием. Без анализа перечисленных, далеко не всех, возникающих направлений деятельности в управлении и менеджменте при использовании информационных технологий невозможно корректно формулировать задачи развития и методы их практического применения в повседневной деятельности.

Глобализация всех процессов в современном обществе приводит к глобализации кризисов управления, при этом окружающий нас мир вновь стремительно меняется. Ещё И. Пригожин в своей известной работе отмечал, что «...Системы и структуры систем определяют эффективность целенаправленной деятельности и отдельного человека и организации и предприятия и государства», отмечая при этом, что «...Не только каждое состояние системы, но и самоопределение системы в том виде, в каком ее описывает модель, обычно нестабильно или, по крайней мере, метастабильно» и, как результат «... Возрастание трудностей – управления - развитием в информационном обществе, зависящим от большого числа взаимодействующих элементов. (Каждое отдельное действие или локальное вмешательство в систему обретает коллективный аспект, который может повлечь за собой совершенно неожиданные глобальные изменения.)»

В настоящее время грань между понятием *управление* и понятием *менеджмент* очень размыта, поэтому в статье принято понятие «наука об управлении», как набор базовых установок, определяющих сферу управленческой реальности. В классическом менеджменте теория управления исходит из экономической модели рыночного хозяйства, где основным регулятором является баланс спроса и предложения. Работы в этом направлении можно сгруппировать в три группы: рационалистическая школа, школа человеческих отношений, школа взаимосвязанных действий – управленческих функций. Менеджмент, с одной стороны, выступал как социологическое учение, а с другой - содержал практические рекомендации по управлению крупным предприятием. Понятие «менеджмент» стало уже интернациональным. Когда говорят «менеджмент», имеют в виду и менеджеров, профессионально осуществляющих функцию управления.

В настоящее время управление прочно осознается, прежде всего, как профессия. Получив наиболее четкое выражение в концепции «научного управления» Тейлора, эта область знаний получила дальнейшее развитие в трудах его последователей - Г. Ганнта, супругов Гилбрет и др., трансформировавших, как уже говорилось, ее первоначальный жесткий рационализм в развитие человеческого фактора, выступавших за внедрение в процесс организации производства современных методов измерения и инструментов. Г. Хопфом был сформулирован принцип оптимальной организации: сохранение равновесия между размерами себестоимости и человеческими способностями, что значительно содействует регулярной реализации задач бизнеса.

Постепенное включение в исследования науки об управлении теории систем, кибернетики, экономико-математических методов, информатизации управления способствовало активному использованию в управлении системного подхода, а не чисто аспектного, концентрирующего внимание на одной или нескольких сторонах интересующей проблемы.

Складывается экономика информационного общества, которая характеризуется рядом специфических признаков:

1. Систематическое увеличение потенциального выпуска.
2. Совокупный спрос сдвигается в сторону информационных потребностей.
3. Совокупное предложение сдвигается в сторону увеличения производства информационных товаров и услуг.

Переход к глобальной сетевой экономике, в т. ч. - информационному менеджменту, информационному маркетингу, электронной торговле и бурно развивающемуся информационному рынку, за счет постоянного обновления технологической базы производства, прежде всего путем применения новых информационно-коммуникативных технологий.

Появляются новые продукты и новые услуги, новые отрасли, новые специальности и новые рабочие места. В результате создание, распространение, обновление и применение

информации происходит опережающими темпами (по сравнению с использованием любых других ресурсов). Информация превращается в массовый продукт. Растущую потребность в информации начинают испытывать не только руководители, но и миллионы граждан. Это связано с децентрализацией (повышением степени свободы индивидуумов, социальных групп и регионов) современного общества, когда важнейшие решения о своем поведении индивидуумы и организации принимают самостоятельно, независимо от центральной власти. Информация превращается в самостоятельную экономическую категорию - ресурсы информационного общества, которые изменяют структуру ресурсов, используемых в экономической деятельности, и требуют одновременного обеспечения постоянного роста индивидуальной, групповой и региональной свободы и всё более жёсткой защиты персональных данных и сведений о хозяйствующих субъектах и субъектах управления различного уровня. Складывается информационный рынок.

Специалисты в области менеджмента считают, что одна из основных трудностей в управленческой деятельности – необходимость принимать решения в условиях неопределенности и недостаточности знаний о возможных последствиях предпринимаемых действий, при этом признается, что современный мир вступил в фазу развития, базирующуюся на системе информационного обеспечения и переработки информации, способной обеспечить, с одной стороны, взаимодействие специалистов различных отраслей знаний, с другой, постоянное увеличение в структуре стоимости корпорации или государства интеллектуальной составляющей или долю корпоративных знаний, т. е. переход от «процессных» методов управления к управлению знаниями. Такое положение объясняется тем, что менеджмент складывался как набор практических приёмов управления, направленных, как правило, на один, максимум два регулируемых параметра. Что же является наиболее характерным для системы управления в настоящее время? Представители «чистого» менеджмента формулируют ответ следующим образом: прежде всего, интернационализация менеджмента, объединение теоретических и практических разработок специалистов разных стран, их коллективное творчество в этой области знаний.

На наш взгляд, в реальности сегодняшнего дня все большую роль играет информационная инфраструктура бизнеса и всех уровней управления в обществе. С одной стороны, освоив новые коммуникационные и развлекательные технологии, миллионы людей по всей планете все шире применяют их в своей трудовой деятельности, а также в сфере почтовой связи. Границы между домашним и офисным миром становятся все более размытыми, и бизнес обязан реагировать на это, ибо новые технологии уже оказывают влияние и на продукты, и на услуги, и на сотрудников компаний. В то же время сеть превращается в базовую систему доставки услуг, которая служит гибкой основой для персонализации пользовательских сервисов. По некоторым оценкам, к 2010 году к Интернету будет подключено до 14 миллиардов устройств. Стремительный рост количества устройств будет и впредь стимулироваться появлением все новых услуг и задач, выполняемых в онлайн-режиме. Сетевая инфраструктура на наших глазах превращается в безопасную платформу для доставки персонализированных услуг юридическому лицу или индивидуальному пользователю, который ищет персонализированные развлечения и услуги, работающие в реальном времени.

Использование информационных технологий создает небывалые возможности для компаний, готовых взять на вооружение новые формы коммуникаций, и небывалые трудности для тех, кто эти формы не воспринимает. Наступает новая эра интерактивных социальных коммуникаций. Этот факт воздействует на весь рынок и все компании, независимо от размера и отрасли.

Технология мгновенных сообщений (Instant Messaging, или IM), вначале захватившая молодежную среду, стала распространяться и в бизнесе. Сегодня текстовыми сообщениями в реальном времени обмениваются не только подростки, но и солидные дяди, работающие в солидных компаниях. Технология IM помогает укреплять взаимодействие между сотрудниками и связи с заказчиками. Простота и стандартный характер Web-услуг дают возможность людям решать, как взаимодействовать с той или иной организацией. Между тем до недавнего времени дело обстояло совсем наоборот. В будущем заказчик будет сам

решать, как обращаться к представителям той или иной компании: лично, по телефону, с помощью видеоконференции, через Web-чат или с помощью нескольких методов сразу.

Все это заставляет предприятия внедрять сети, ориентированные на пользовательские услуги. В быстро меняющейся информационной экономике конкурентное преимущество заключается не только в характеристиках продукта (который к тому же можно скопировать), но и в учете запросов и пожеланий сегодняшних и будущих заказчиков. Для этого нужны гибкие бизнес-процессы, которые основаны на Web-сервисах и сетевых технологиях, ориентированных на услуги.

Говоря об электронной коммерции, часто имеют в виду онлайн-розничную торговлю. У всех на слуху такие известные Интернет - магазины, как dostavka.ru, buy.ru и ozon.ru. Практически незаметно проходят серьезные изменения в межфирменной онлайн-коммерции. До последнего времени в пример приводились корпоративные коммерческие порталы таких фирм, как Cisco и Dell Computer, на которых корпоративные клиенты заказывают оборудование, минуя посредников. Но и эти порталы мало отличаются от розничных электронных магазинов. Снова один продавец и много покупателей. Настоящая революция происходит за пределами отдельных фирм.

Появился новый тип посредников, которые начали серьезно влиять на развитие межфирменной онлайн-торговли. Они играют роль электронных узлов (хабов), каждый из которых специализируется либо на определенной продукции, либо на определенном бизнес-процессе, особенность таких электронных коммерческих узлов в том, что они концентрируют, маршрутизируют и коммутуют информационные потоки, превратившись фактически в торговые электронные площадки.

«Мы все - члены какой-нибудь социальной сети. Или пяти, или десяти», писал в своем блоге создатель LiveJournal Брэд Фитцпатрик. Технологии интернета дали возможность легко связывать людей, желающих оказаться связанными. В центре таких распределенных организаций общие цели, интересы, стремление создать ценность, облегчить жизнь или приятно провести время. Интернет дал уникальные инструменты упорядочивания этих отношений, превратил потенциальные возможности в алгоритмы. Оцифровываясь и группируясь вокруг идеи сообщества - объединяющего и дифференцирующего признака, в сети уже функционирует столько сообществ, сколько этих признаков мы можем придумать. С помощью социальных сетей уже можно искать работу, продать и купить квартиру, занять денег, получить совет, снять фильм, прославиться и заработать, отправиться в путешествие, любить.

Аккумулируя аудиторию, социальные сети становятся одними из самых дорогих медиапредприятий планеты. При десятках миллионов членов капитализация таких проектов, как Flickr, MySpace, Facebook перевалила за миллиард долларов. Всего через несколько лет появления на свет (первый подобный проект – Friendster - возник в 2003 году) социальные сети становятся питательной средой для новых компаний и формируют новые рынки. И бизнес по строительству социальных сетей уже скоро может стать самой горячей точкой на отраслевой карте информационных технологий

Сложившиеся в менеджменте базовые стандарты управления: управление материальными, производственными и другими ресурсами, (MRP - material resource planning, MRP II, ERP - Enterprise Resource Planning, CRM – client relationship management), не учитывают принципиальный вопрос – информационно-телекоммуникационную структуру объекта управления. Вывод может быть сформулирован следующим образом: правильно спроектированная информационная среда порождает эффективную систему управления.

Поляков Александр Александрович

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г.Москва

Доктор технических наук, профессор

Зав. кафедрой «Информационные системы в управлении»

Председатель НТК «Информационные технологии в образовании»

E-mail: polyakov@gpa.msu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

УДК 621.9.02.001.63

С.И. БРУСОВ, М.В. ЖУПЛОВ, А.С. ТАРАПАНОВ

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ ДИСКОВЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО
ОТОБРАЖЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ**

В статье приводится алгоритм профилирования дисковой фрезы для обработки винтовой поверхности, основанный на нахождении нулевых толщин срезаемых слоев в процессе виртуального представления кинематической схемы резания, в котором все движения совершает номинальная винтовая поверхность. Приведен пример определения профиля.

In clause the algorithm of profiling of a disk mill for processing the screw surface, based on a finding of zero thickness of layer is resulted at the analysis of the kinematic scheme of cutting in which all movements is made with a nominal screw surface. The example of definition of the disk mill profile is resulted

В современном машиностроении широко используются изделия, содержащие сложные фасонные поверхности. Профилирование инструмента для обработки таких поверхностей является одним из наиболее сложных и трудоемких этапов проектирования. Наиболее проблематичными с точки зрения профилирования считаются винтовые поверхности. Это объясняется тем, что однозначного соответствия между профилями инструмента и винтовой поверхности не существует. В то же время условия жесткой конкуренции требуют уменьшения сроков на проектные работы. Поэтому основополагающим критерием для новых методов профилирования должна служить возможность создания САПР на их основе. Имеющиеся методы профилирования не всегда полностью поддаются полной автоматизации в силу заложенных в них противоречий.

Разрабатываемая методика профилирования инструмента для обработки винтовых поверхностей, основанная на трехмерном математическом отображении схемы резания, строится по единому алгоритму для всех исходных профилей и имеет математический аппарат, поддающийся адаптации для создания программ САПР [1].

Основу данного метода составляет математическое описание процесса формообразования, или обработки винтовой поверхностью профиля инструмента, которое сводится к выводу выражения по каждой из координат, описывающего положение точек винтовой поверхности в любой момент времени обработки [1]. Первоначально описывается винтовая поверхность в параметрическом виде. Затем посредством ввода новых параметров производится вывод выражения, описывающего перемещение винтовой поверхности. При этом все движения выполняет винтовая поверхность. Для фрезерования винтовой поверхности дисковой фрезой выражение процесса формообразования выглядит следующим образом:

$$x_{\text{нрн}} = \left[\begin{array}{l} \left[x_1(u_i) \cos \psi_j - y_1(u_i) \sin \psi_j \right] \cos \varphi_k - \left[y_1(u_i) \cos \psi_j + x_1(u_i) \sin \psi_j \right] \sin \varphi_k \cos \omega - \\ - \left[p_b \cdot (\psi_j + \varphi_k) \right] \sin \omega \end{array} \right] \cos v_n - ;$$

$$- \left[A_\omega + \left[y_1(u_i) \cos \psi_j + x_1(u_i) \sin \psi_j \right] \cos \varphi_k + \left[x_1(u_i) \cos \psi_j - y_1(u_i) \sin \psi_j \right] \sin \varphi_k \right] \sin v_n$$

$$y_{i_{\text{жкн}}} = [A_{\omega} + [y_1(u_i) \cos \psi_j + x_1(u_i) \sin \psi_j] \cos \varphi_k + [x_1(u_i) \cos \psi_j - y_1(u_i) \sin \psi_j] \sin \varphi_k] \cos v_n +$$

$$+ \left[[x_1(u_i) \cos \psi_j - y_1(u_i) \sin \psi_j] \cos \varphi_k - [y_1(u_i) \cos \psi_j + x_1(u_i) \sin \psi_j] \sin \varphi_k \right] \cos \omega -$$

$$\left[-p_b \cdot (\psi_j + \varphi_k) \right] \sin \omega \quad ; \quad (1)$$

$$z_{i_{\text{жкн}}} = [p_b \cdot (\psi_j + \varphi_k)] \cos \omega +$$

$$+ [x_1(u_i) \cos \psi_j - y_1(u_i) \sin \psi_j] \cos \varphi_k - [y_1(u_i) \cos \psi_j + x_1(u_i) \sin \psi_j] \sin \varphi_k \sin \omega$$

где i – номер точки, изменяющейся по параметру u ;

j – номер точки, изменяющейся по параметру ψ ;

$x_1(u_i)$, $y_1(u_i)$ – функции, описывающие торцевой профиль винтовой поверхности, в координатах винта;

u_i – параметр, описывающий положение точки в торцевом профиле;

ψ_j – параметр, описывающий положение точки при ее винтовом движении;

p_b – винтовой параметр;

k – номер точки, изменяющейся по параметру $\varphi(S_1)$;

n – номер точки, изменяющейся по параметру $\varphi(V)$;

φ – параметр, определяющий положение заготовки при ее вращении вокруг собственной оси;

v – параметр, определяющий положение заготовки при ее вращении вокруг оси инструмента;

ω – угол наклона инструмента, относительно винтовой поверхности;

A_{ω} – межосевое расстояние.

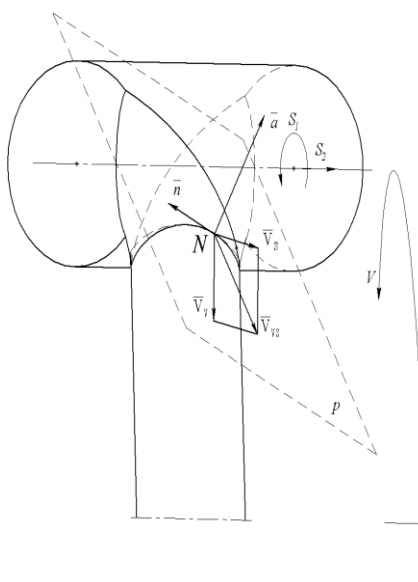


Рисунок 1 – Схема определения кинематических параметров

Разрабатываемая методика профилирования строится на определении для каждого участка профиля винтовой поверхности, в процессе их совместного обката, толщины срезаемого слоя и последующем выборе ее с минимальным значением [2]. Для каждой кривой, составляющей исходный профиль винтовой поверхности, такая точка будет одна. Условно можно считать эту точку одновременно принадлежащей и инструменту, и винтовой поверхности. Найдя для ряда положений такие точки, можно получить профиль инструмента.

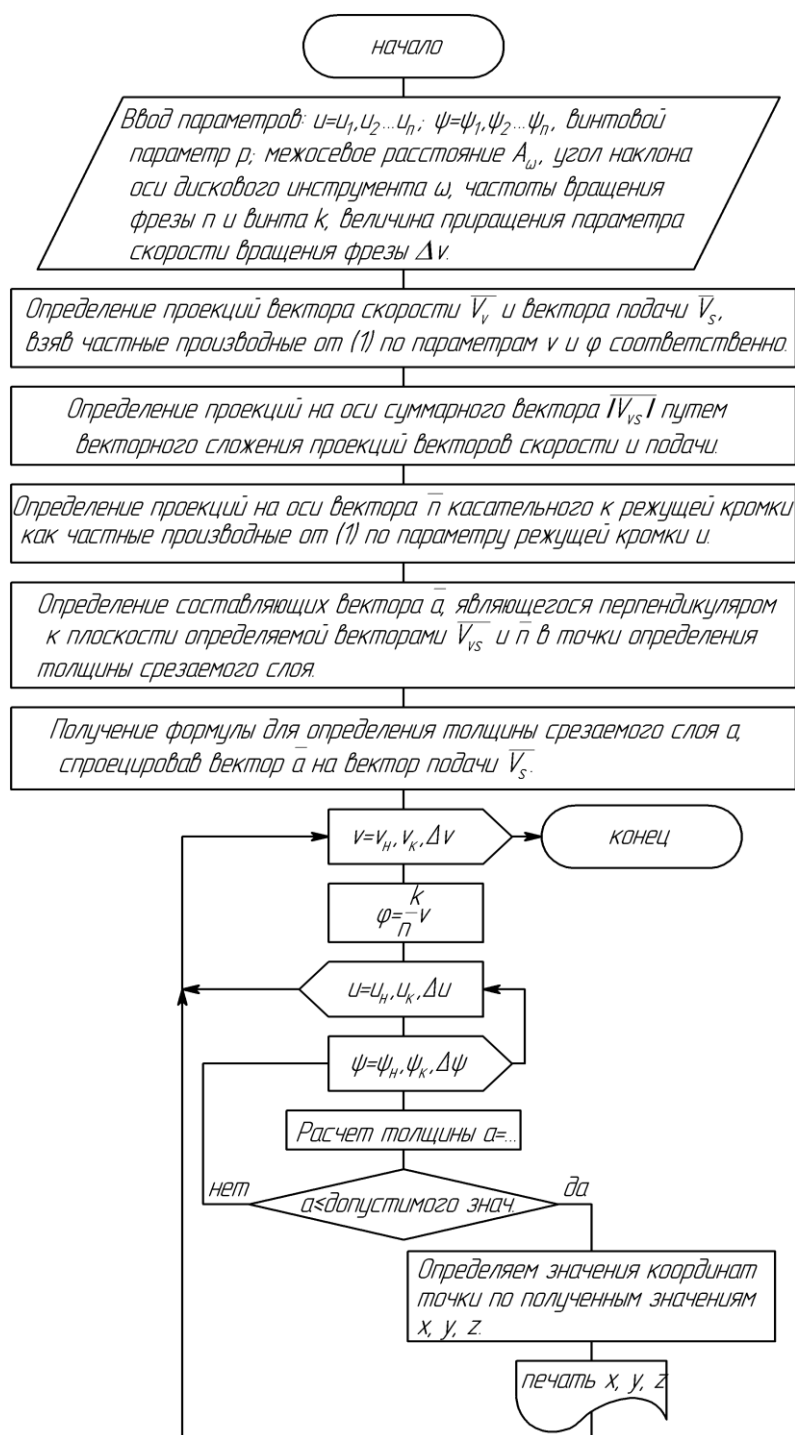


Рисунок 2 – Алгоритм профилирования, изображенный в виде блок-схемы

Толщина срезаемого слоя определяется в направлении, перпендикулярном плоскости p касательной к поверхности резания в каждой точке (рис. 1). Поверхностью резания в данном случае является винтовая поверхность. Плоскость p определяется суммарным вектором скорости \bar{V}_{vs} и вектором \bar{n} , касательным к режущей кромки.

Имея математическое описание процесса формообразования (1), представим алгоритм нахождения профиля в виде блок-схемы (рис. 2).

По представленной методике был получен профиль дисковой фрезы. Исходный профиль винтовой поверхности представлен в торцевом сечении (рис. 3).

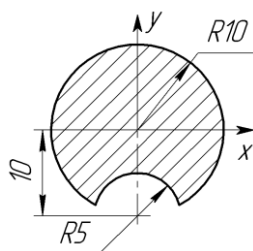


Рисунок 3 – Торцевой профиль винтовой поверхности

Исходные параметры: шаг винтовой поверхности $P=100$ мм, угол наклона оси дискового инструмента относительно оси винта $\omega = -1,13$ рад, межосевое расстояние $A_\omega = 200$ мм, $u_n = 0,25$ рад, $u_k = 2,89$ рад, $\psi_n = -6,2$ рад, $\psi_k = -6,2$ рад.

Произведен расчет по более упрощенному алгоритму, чем представлен на рисунке 2. Задавая приращение параметру u и с помощью алгоритма минимизации по толщине срезаемого слоя, получаем соответствующие значения параметра ψ . Параметры точек, для которых толщина срезаемого слоя не превышает значения $\pm 0,01$ мм, считаем точками, принадлежащими формообразующей и номинальной поверхности. Полученные точки образуют пространственную линию контакта. Для представления инструмента в осевом сечении преобразуем координаты x и y в радиус $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ и получаем профиль (рис. 4).

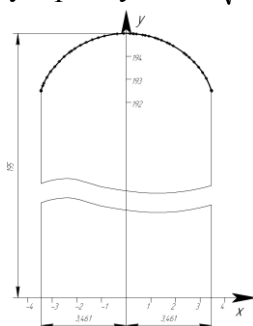


Рисунок 4 – Профиль фрезы в осевом сечении

ЛИТЕРАТУРА

1. Брусов, С.И. Управляемые L-системы для оптимизации процесса обработки и профилирования винтовых поверхностей [Текст] / С.И. Брусов, М.В. Жуплов, А.С. Тарапанов // Сборник статей IX Международной научно-практической конференции. Современные технологии в машиностроении. – Пенза: ПДЗ, 2007. – С. 177–179

2. Брусов, С.И. Комплексный анализ параметров лезвийной обработки винтовых поверхностей [текст] / С.И. Брусов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов; под ред. А.С. Тарапанова. – М.: Машиностроение-1, 2006. 128 с.: ил.

Тарапанов Александр Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор
Тел. (4862) 541451,
E-mail: admin@ostu.ru

Брусов Сергей Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук

Жуплов Михаил Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант

А.В. СЫТИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ КУЛОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕПЕСТКОВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

В статье представлена математическая модель и результаты расчета лепестковых газодинамических подшипников, являющихся на данный момент перспективными опорами роторов высокоскоростных машин. На основании применения моментной теории цилиндрических оболочек для расчета деформаций отдельного участка рассмотрена задача расчета деформаций кругового гофрированного элемента лепесткового газодинамического подшипника под действием газодинамических сил в смазочном слое.

The mathematical model and results of the calculation foil gas bearing, being the most perspective full tilt rotor speediest machines on given moment, are presented in article. The problem of the calculation deforming the circular corrugated element foil gas bearing under the action of gasdynamic of power in lubricating layer is considered on the grounds of using moment to theories cylindrical shell for calculation deforming the separate area.

Эффективным способом повышения удельных характеристик машин является увеличение частот вращения роторов, наибольшие значения которых могут быть достигнуты при использовании газовой, преимущественно воздушной, смазки. Опоры с газовой смазкой обладают практически неограниченной предельной быстроходностью, имеют высокий уровень демпфирования, работают с весьма малыми потерями и нагревом, сохраняют точность положения вала. Перспективными в данном классе являются опоры с упруго-податливыми элементами, так называемые лепестковые газодинамические подшипники (рис. 1). Податливость лепестка позволяет обеспечить чрезвычайно малые зазоры между цапфой и лепестком на большой площади и получить несущую способность, достаточную для многих высокооборотных турбомашин различного назначения.

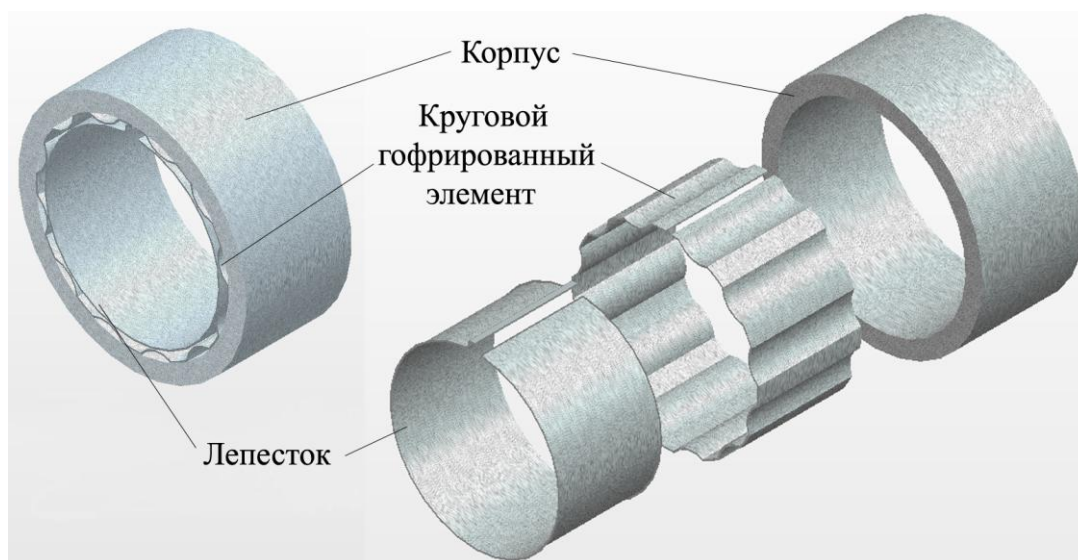


Рисунок 1 – Лепестковый газодинамический подшипник с упругими элементами

Лепесток имеет тонкое антифрикционное покрытие, обеспечивающее минимальный износ при запуске и останове. Во время работы машины слой газовой смазки разделяет подшипник и вал и тем самым защищает их от износа. При вращении вала формируется

клинообразная полость под воздействием радиальных смещений вала. Лепесток прогибается, обеспечивая некоторую толщину смазочного слоя, превышающую толщину при эквивалентной жесткой поверхности, что приводит к снижению потерь мощности [3]. Гофрированный элемент работает как пружина, обеспечивающая подстройку под центробежное увеличение диаметра, резкие скачки, а также служит для подавления неустойчивости. Этот элемент также создает проточную часть для охлаждающего воздуха, уносящего тепло от подшипника.

В чистом виде получается, что относительное перемещение является добавочным и в свою очередь создает высокое кулоновское демпфирование, эквивалентное эффекту трения (рис. 2).

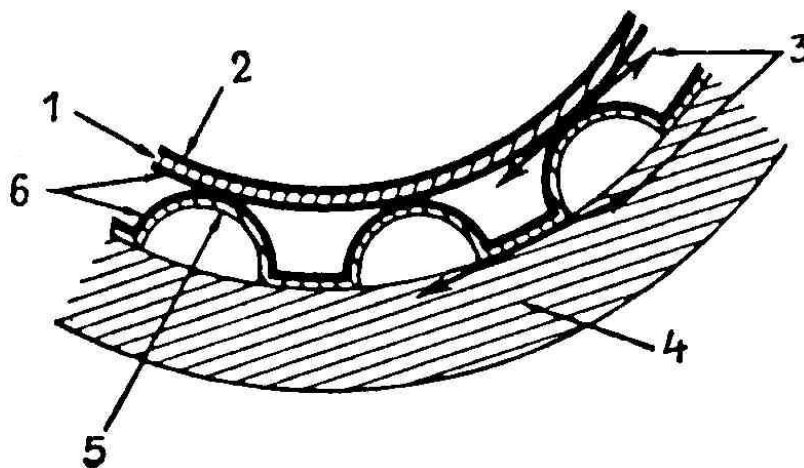


Рисунок 2 – Реализация кулоновского демпфирования

1 – лепесток, 2 – внутреннее покрытие лепестка с малым коэффициентом трения, для наименьшего износа во время пуска и останова, 3 – механизм и основные направления трения Кулона, 4 – корпус подшипника, 5 – круговой гофрированный элемент, 6 – внешнее покрытие лепестка и кругового гофрированного элемента с коэффициентом трения, необходимым для реализации механизма трения Кулона

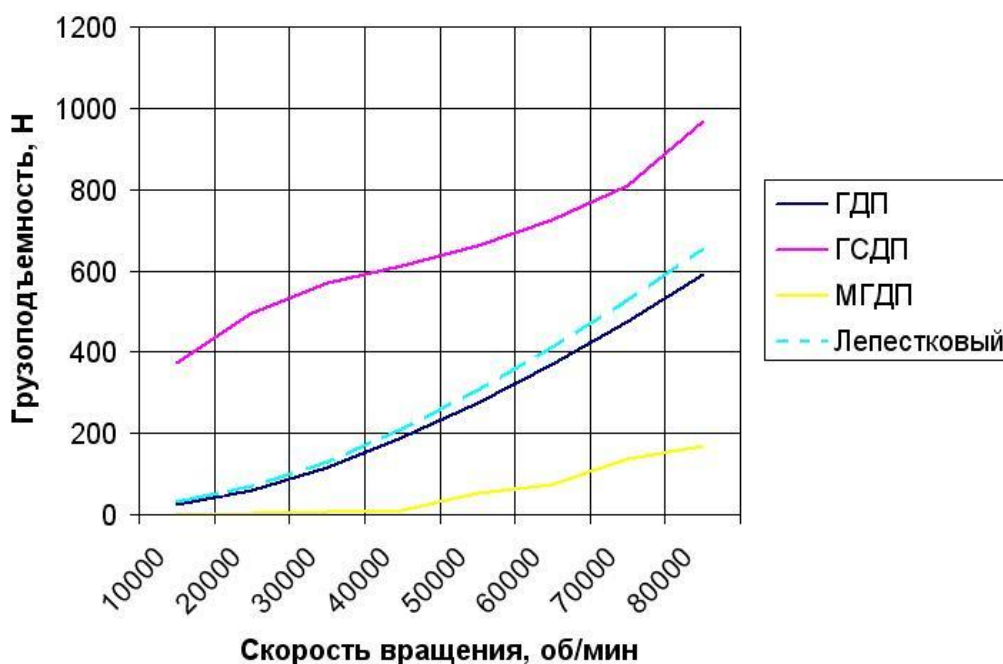


Рисунок 3 – Сравнение грузоподъемности подшипников с газовой смазкой

Лепесток описывается системой дифференциальных уравнений равновесия в перемещениях для тонкой незамкнутой цилиндрической оболочки рассчитываемой по моментной теории [1]:

Один из методов реализации кулоновского демпфирования в показанной конструкции связан с относительным движением между лепестком и круговым гофрированным элементом и между круговым гофрированным элементом и корпусом. Это относительное движение возникает, когда круговой гофрированный элемент деформируется под нагрузкой. Выбором комбинаций материалов можно оптимизировать демпфирующее влияние кулоновского трения. Без этого стабилизирующего механизма (трения Кулона) высокие давления и, следовательно, высокая несущая способность, порождаемые газодинамическим эффектом, не реализуемы из-за преобладания дробно-частотного вихревого движения (рис. 3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-\nu}{2R^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z \partial \theta} + \frac{\nu}{R} \cdot \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \frac{1+\nu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta} = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} p_r(\theta, z); \\ \frac{\nu}{R} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \frac{w}{R^2} + \\ + \frac{k_1}{R} \left[R^3 \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2R \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right] = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} p(\theta, z), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $k = \frac{\delta^2}{12R^2}$, R – радиус лепестка, δ – толщина лепестка, w, ϑ, u – перемещения, соответственно, в радиальном, окружном и осевом направлениях, $p(\theta, z)$ – нормальное контактное усилие (давление), $p_r(\theta, z)$ – касательное контактное усилие (кулоновское трение).

Функции $p(\theta, z)$ и $p_r(\theta, z)$ связаны между собой следующим выражением:

$$p_r(\theta, z) = f \cdot p(\theta, z), \quad \text{где } f \text{ – коэффициент трения} \quad (2)$$

Решение системы (1) совместно с граничными условиями, описывающими свободные торцы, а также жестко закрепленную и свободную образующие, однозначно определяет перемещения цилиндрической оболочки.

Круговой гофрированный элемент представим в виде набора отдельных гофров, описываемых системой уравнений аналогично (1), для незамкнутых цилиндрических оболочек со свободными торцами, и свободным опиранием образующих на корпус подшипника. Условия закрепления и связи гофров друг с другом моделируются граничными условиями.

Для описания внешней нагрузки, действующей на отдельный гофр в произвольном сечении (рис. 4), выделим точки: A_i, B_i, C_i .

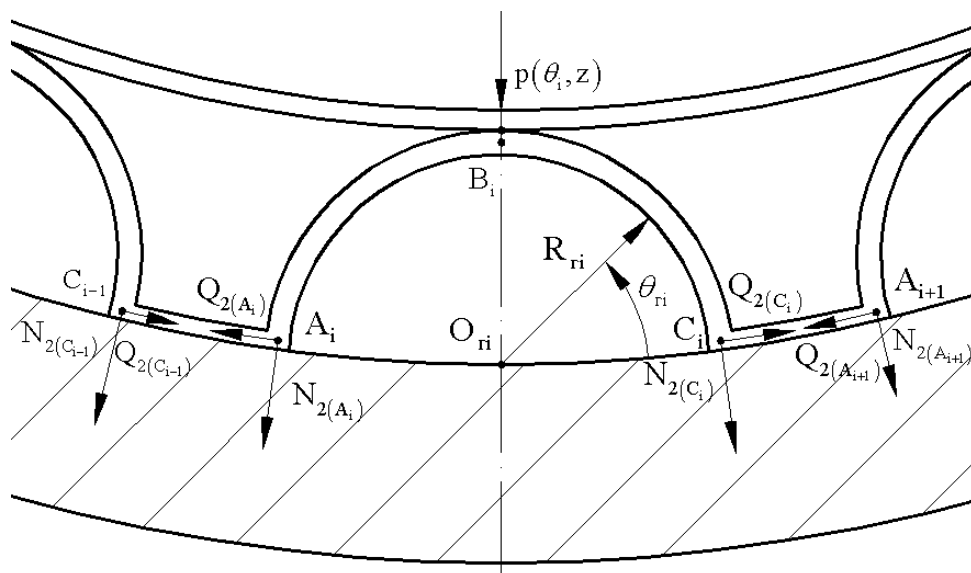


Рисунок 4 – Схема действующих сил

Действующая со стороны лепестка нормальная нагрузка, а также нагрузка со стороны двух соседних гофров, находится из следующего условия:

$$p_{ri}(\theta_{ri}, z) = \begin{cases} Q_{2(A_{i+1})} - p_{\tau(C_i)}(\theta_r, z), & \theta_{ri} = \theta_{0ri}, Q_{2(A_{i+1})} > Q_{2(C_i)}; \\ Q_{2(A_{i+1})} + p_{\tau(C_i)}(\theta_r, z), & \theta_{ri} = \theta_{0ri}, Q_{2(A_{i+1})} < Q_{2(C_i)}; \\ p(\theta_1, z), & \theta_{ri} = \theta_{\max ri} / 2 \\ Q_{2(C_{i-1})} - p_{\tau(A_i)}(\theta_r, z), & \theta_{ri} = \theta_{\max ri}, Q_{2(C_{i-1})} > Q_{2(A_i)}; \\ Q_{2(C_{i-1})} + p_{\tau(A_i)}(\theta_r, z), & \theta_{ri} = \theta_{\max ri}, Q_{2(C_{i-1})} < Q_{2(A_i)}. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение для перерезывающей силы соответствует уравнению:

$$Q_{r2} = \frac{D_r}{R_r^3} \left((1-\nu) \frac{\partial^2 g_r}{\partial z^2} - R_r^2 \frac{\partial^3 w_r}{\partial z^2 \partial \theta_r} + \frac{\partial^2 g_r}{\partial \theta_r^2} - \frac{\partial^3 w_r}{\partial \theta_r^3} \right). \quad (4)$$

Входящую в условие (3) силу трения с учетом величины контактирующей поверхности, находим следующим образом:

для точки A_i

$$p_{\tau(A_i)} = f \cdot (N_{2(A_i)} + N_{2(C_{i-1})}) \cdot \frac{(R+H) \frac{(\theta - n \cdot \theta^*)}{n} + \delta}{2\delta}; \quad (5)$$

для точки C_i

$$p_{\tau(C_i)} = f \cdot (N_{2(C_i)} + N_{2(A_{i+1})}) \cdot \frac{(R+H) \frac{(\theta - n \cdot \theta^*)}{n} + \delta}{2\delta}, \quad (6)$$

где H – высота гофра, в частном случае $H = R_r$, θ – угловая протяженность кругового гофрированного элемента (считаем равной угловой протяженности лепестка); n – количество гофров; θ^* – угловая протяженность одного гофра произвольного радиуса, на основании теоремы синусов, вычисляется по формуле:

$$\theta^* = 2 \arcsin \left(\frac{R_r}{R+H} \sin \frac{\theta_{r\max}}{2} \right). \quad (7)$$

Для левого края n – го гофра уравнение сил:

$$Q_n - Q_{n-1} - p_{\tau(A_i)} = 0. \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\delta_a^2}{12 \cdot R_a^3} \left((1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \vartheta_{\bar{a}n}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \vartheta_{\bar{a}n-1}}{\partial z^2} \right) - R_a^2 \left(\frac{\partial^3 w_{\bar{a}n}}{\partial z^2 \partial \theta_{\bar{a}n}} - \frac{\partial^3 w_{\bar{a}n-1}}{\partial z^2 \partial \theta_{\bar{a}n-1}} \right) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial^2 \vartheta_{\bar{a}n}}{\partial \theta_{\bar{a}n}^2} - \frac{\partial^2 \vartheta_{\bar{a}n-1}}{\partial \theta_{\bar{a}n-1}^2} \right) - \left(\frac{\partial^3 w_{\bar{a}n}}{\partial \theta_{\bar{a}n}^3} - \frac{\partial^3 w_{\bar{a}n-1}}{\partial \theta_{\bar{a}n-1}^3} \right) \right) - \\ & - f \cdot K_3 \left(\frac{1}{R_a} \cdot \left(\frac{\partial \vartheta_{\bar{a}n}}{\partial \theta_{\bar{a}}} + \frac{\partial \vartheta_{\bar{a}n-1}}{\partial \theta_{\bar{a}}} \right) + \frac{1}{R_a} (w_{\bar{a}n} + w_{\bar{a}n-1}) + \nu \left(\frac{\partial u_{\bar{a}n}}{\partial z} + \frac{\partial u_{\bar{a}n-1}}{\partial z} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

коэффициент, характеризующий площадь поверхности кулоновского трения:

$$K_3 = \frac{(R+H) \frac{(\theta - n \cdot \theta^*)}{n} + \delta_a}{2\delta_a}$$

Аналогичным образом выводится уравнение сил для правого края n – го гофра.

Полученные значения перемещений используются для решения комплексной термоупругой газодинамической задачи расчета характеристик лепесткового газодинамического подшипника. Расчет характеристик подшипников скольжения предполагает определение полей давления в смазочном слое. Уравнение Рейнольдса для подшипника с газовой смазкой в случае стационарного течения имеет вид [2]:

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{\mu K_\theta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\omega \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta}, \quad (10)$$

где p – давление газа, ρ – плотность, μ – вязкость, R – внутренний радиус подшипника.

Функцию радиального зазора, входящую в уравнение Рейнольдса, можно представить в виде двух составляющих:

$$h = h_0 + e \cos(\theta - \varphi) + w, \quad (11)$$

где w – прогиб упругого элемента, e – эксцентриситет, θ – расчетный угол.

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать лепестковые подшипники с разнообразной конструкцией кругового гофрированного элемента (рис. 5).

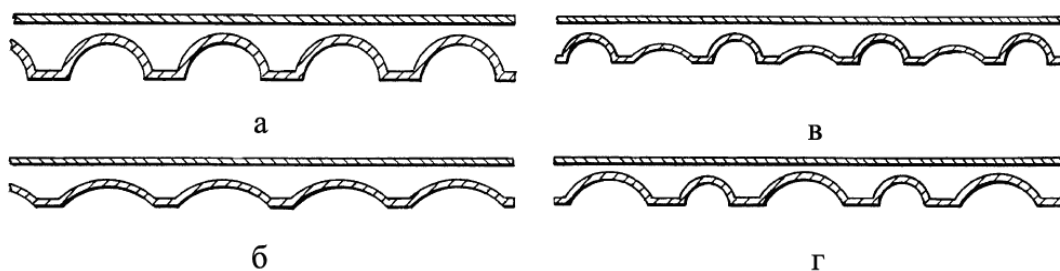


Рисунок 5 – Конструкции кругового гофрированного элемента

Учет эффекта кулоновского трения позволяет не только учесть процессы, происходящие при взаимном перемещении упругих элементов исследуемой опоры, а также выявить закономерности влияния коэффициента трения на основные характеристики лепесткового подшипника. Результатом является выбор фрикционных покрытий, обладающих не только высоким и стабильным коэффициентом трения, но и высокой износостойкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колкунов, Н.В. Основы расчета упругих оболочек [Текст]/ Н.В. Колкунов. –М.: Высшая школа, 1963. – 278 с.
2. Хешмет, Х. Анализ газового ленточного радиального подшипника [Текст]/ Х. Хешмет, Дж. Уолвит, О. Пинкус. - Проблемы трения и смазки. –1983. –Т.105. –№4. – С. 124-132.
3. Пешти, Ю.В. Газовая смазка [Текст]/ Ю.В. Пешти. – М.: МГТУ, 1993. – 381с.

Сытин Антон Валерьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Заведующий лабораторией кафедры «Инженерная графика и САПР»
Тел. (4862) 41-98-41
E-mail: sytin@ostu.ru

УДК 62-762

А.И. ПАНЧЕНКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

В статье рассмотрен новый тип подшипников жидкостного трения - многослойные. Характерной особенностью данного типа опор является наличие трех несущих слоев. Предложена методика расчета суммарной несущей способности с учетом центрирующего эффекта Ломакина, приведен ряд расчетных зависимостей.

In this article we considered a new kind of sliding bearings-multisupporting. Its essential feature is availability of three carrying layers. Here we introduced methods of total carrying capacity calculation taking the centering Lomakin effect into consideration. A number of calculating relations is given below.

Функционирование транспортной и энергетической отрасли без насосного оборудования не представляется возможным. Частоты вращения роторных машин достигают сотен тысяч оборотов в минуту. Протечки внутри машины во многом определяют ее КПД, повышение которого в условиях ограниченности органических топливных ресурсов становится актуальной задачей, с другой стороны, не менее важна проблема уменьшения

массогабаритных показателей насосных установок при сохранении или увеличении производительности. Одним из способов решения обозначенной проблемы может стать объединение функции уплотнения и подшипника скольжения в единой конструкции. Выходом из сложившейся ситуации может стать использование нового типа опор скольжения – гидродинамических многослойных подшипников жидкостного трения с проточной смазкой (рис. 1) [1].

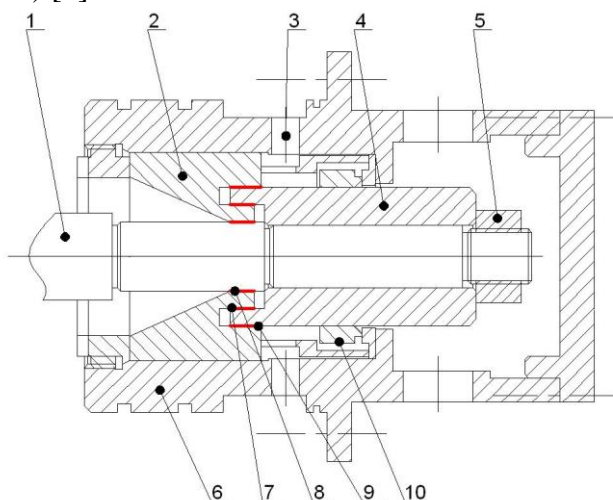


Рисунок 1 – Конструктивная схема опорного узла

Рабочее тело, проходя через сложный гидравлический тракт многослойного подшипника, образующего три радиальных несущих слоя, преодолевает и осевые кольцевые каналы, объем которых полагается существенно большим в сравнении с объемом радиального участка. Исходя из вышеуказанной особенности существенной разности радиального и осевого объемов, рабочее тело при истечении из камеры большего размера в радиальный канал вследствие избыточного давления, часть потенциальной энергии давления затрачивается на преодоление местных гидравлических сопротивлений, обусловленных сужением потока, часть переходит в кинетическую энергию жидкости, дальнейшие потери в радиальном канале обусловлены трением по длине канала. При истечении жидкости из радиального канала в осевой происходит обратный процесс и так далее. Таким образом, сделанные предположения позволяют определить промежуточные граничные условия для слоев опоры (рис. 2).

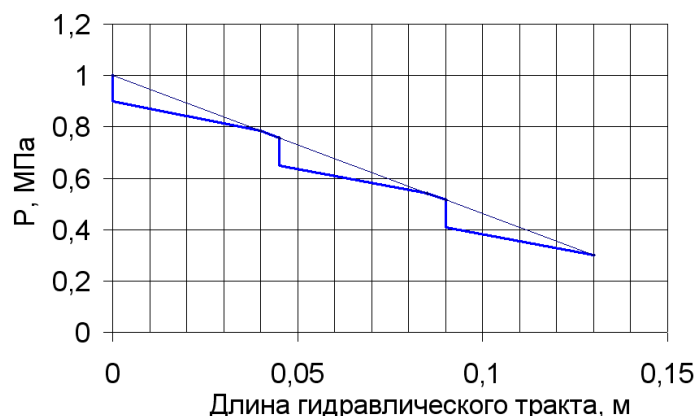


Рисунок 2 – Падение давления по длине гидравлического тракта

Экспериментальные исследования распределения давления по длине щелевых и лабиринтных уплотнений проводились в научных центрах следующих университетов и фирм: Turbomachinery Laboratory at Texas A&M University, Virginia Polytechnic Institute and State University, Dresser-Rand Co., Technische Universität München. Распределение давления по длине щелевого уплотнения представлено на рисунке 3 [4], в целом картины, полученные

в результате эмпирических исследований, качественно и количественно согласуются с результатами расчетов.

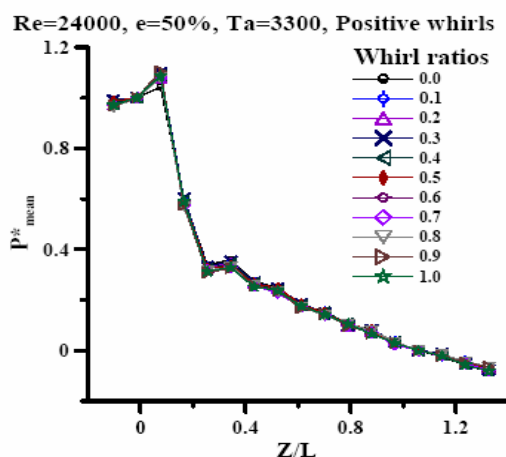


Рисунок 3 – Распределение осредненного давления по длине радиального подшипника-уплотнения

Основой для построения математической модели истечения рабочего тела через зазор опоры скольжения является модифицированное уравнение Рейнольдса, обобщенное на случай двумерного турбулентного течения вязкого сжимаемого смазочного материала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3 \cdot \rho}{\mu K_z} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot U \cdot h) + 12 \rho V + 12 h \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (1)$$

где h – функция радиального зазора; μ , ρ – вязкость и плотность смазочного материала; K_x , K_z – коэффициенты турбулентности; e – эксцентриситет.

Еще в 50-е года прошлого века внимание ученых привлек факт наличия центрирующей силы ротора в зазоре щелевого уплотнения в условиях дросселируемого давления, в которых расчет проекций центрирующей силы велся по формулам [2, 3]:

$$F_{px} = -k_p \frac{l}{2} (1 + 2\Delta\chi) v_y, \quad F_{py} = -k_p \left(\varphi_f y - \frac{l}{2} (1 + 2\Delta\chi) v_x \right); \quad (2)$$

где $k_p = \frac{\pi r l \Delta p_0}{2 h_0}$; θ_0 – параметр конусности $\theta_0 = \frac{v_0 L}{2H}$; R – радиус вала, м; v_x , v_y –

составляющие угла конусности по соответствующим осям; \bar{e} – безразмерный эксцентриситет, $\bar{e}^2 = X^2 + Y^2$; h_0 – радиальный зазор, м; $\Delta\chi$ – относительный коэффициент гидравлических потерь; $N = \frac{2(1+n)}{2-n}$; n – постоянная в формуле Блазиуса [3].

Коэффициенты местных сопротивлений, в основном, определяются экспериментально в зависимости от формы кромок. Ввиду специфичности геометрии и характерного значительного перепада давления на входе и выходе многоопорного подшипника было произведено исследование влияния геометрических и эксплуатационных характеристик на общий взнос в грузоподъемность опоры на различных режимах работы.

Алгоритм расчета силы Ломакина-Этингера в соответствии с приведенными зависимостями (5) был реализован в среде математического моделирования MatLab и решался совместно с программой по определению полей давлений, статических и динамических характеристик гидродинамического многослойного подшипника скольжения. На рис. 3 представлено три кривых грузоподъемности, соответствующих силе Ломакина в

опоре, гидродинамической силе в трехслойном подшипнике с учетом теплофизических параметров и без учета последних.

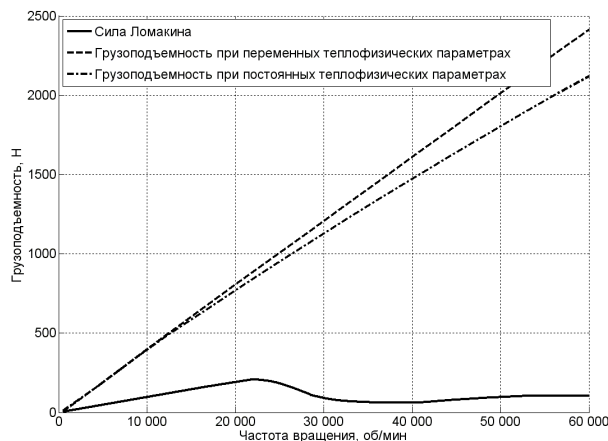


Рисунок 3 – Сравнение статической и динамической несущей способности многослойного подшипника скольжения

Помимо существенного отличия динамической грузоподъемности опоры с учетом и без учета переменности теплофизических параметров, внимание привлекает ход зависимости для силы Ломакина от частоты вращения, объясняющийся зависимостью центрирующего эффекта от числа Рейнольдса, определяющего режим течения смазочного материала и влияющего на результат счета через постоянную Блазиуса n , косвенно входящую во вспомогательные зависимости для расчета эффекта статической грузоподъемности. Таким образом, участок на кривой зеленого цвета (рис. 2), соответствующий 25 000 об/мин – 50 000 об/мин, характеризуется сменой режимов истечения смазочного материала.

Сложный гидравлический тракт, смазочная среда, проходящая последовательно через три смазочных слоя, высокие частоты вращения, существенное влияние эксплуатационных и рабочих параметров в процессе работы роторной машины не позволяют говорить однозначно о статических характеристиках многослойного гидродинамического подшипника скольжения. Следует особо отметить, что при перепадах дросселируемого давления более 1,4 МПа, радиальных зазорах в трех слоях более 130 мкм учет статической центрирующей силы для многослойных гидродинамических подшипников становится обязательен, ввиду существенного качественного и количественного изменения картины поведения статических характеристик в зависимости от параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2231694 Российская Федерация, МКИ 7F16C 29/02, 17/00. Опора скольжения [Текст] / Савин Л.А., Алехин А.В., Соломин О.В., Панченко А.И., Керсновский О.В. - № 2003110901/11; заявл. 16.04.03; опубл. 27.06.04; бюл. №18.; приоритет 16.04.03. - 5 с.: ил.
2. Ломакин, А.А. Расчет критического числа оборотов ротора и условия обеспечения динамической устойчивости роторов высоконапорных гидромашин с учетом сил, возникающих в уплотнениях [Текст] / А.А. Ломакин. - Энергомашиностроение. - 1958. - №4. - С. 1-5.
3. Марцинковский, В.А. Гидродинамика дросселирующих каналов [Текст] / В.А. Марцинковский. – Сумы: Издательство СумГУ, 2002. – 337 с.
4. Experimental measurement of phase averaged wall-pressure distributions for a 25% eccentric whirling annular seal/ D. Cusano M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, 2006. – 76 p.

Панченко Алексей Иванович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирант

Тел. +7(4862)41-98-49; e-mail: pmp1@ostu.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 662.927:005.85

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Ю.С. СТЕПАНОВ, О.С. ПЕТРОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С НАКЛОННОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

В статье разработана модель движения потока теплоносителя в устройстве регулирования с наклонной перегородкой и получена теоретическая зависимость коэффициента гидравлического сопротивления устройства от угла наклона перегородки. Определена теоретически и подтверждена экспериментально область значений угла наклона перегородки регулирующего устройства, в пределах которой выполняются требования нормативной документации к коэффициенту гидравлического сопротивления.

In this article the model of movement of a stream of the heat-carrier in the device of regulation with an inclined partition is developed, theoretical dependence of factor of hydraulic resistance of the device on a corner of an inclination of a partition is received. The area of value of a corner of an inclination of a partition of the regulating device within the limits of which requirements of the normative documentation to factor of hydraulic resistance are carried out is proved.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания комфортных температурных условий в отапливаемых помещениях лечебно-профилактических учреждений (в дальнейшем ЛПУ) при экономном расходовании тепловой энергии предложено оригинальное устройство контроля и регулирования температуры [1].

Необходимость разработки этого устройства обусловлена тем, что выпускаемые отечественной промышленностью и за рубежом устройства (табл. 1), предназначенные, в основном, для двухтрубных систем отопления, имеют значение коэффициента гидравлического сопротивления ζ в пределах от 5 до 14,6. По этой причине они не могут эффективно использоваться для индивидуального регулирования температуры в помещениях ЛПУ, оборудованных однетрубными системами, для которых необходимо выполнение условия $\zeta \leq 3,5$ [2].

В основу предложенного устройства контроля и регулирования температуры заложена гипотеза о том, что снижение гидравлического сопротивления регулирующей арматуры можно обеспечить путем наклона перегородки с проходным отверстием. Предложено выполнить перегородку наклонной под некоторым углом $\alpha \neq 0$ (рисунок 1), при этом предполагается, что с увеличением α потери при прохождении теплоносителя должны уменьшиться, а значение ζ , соответственно, снизиться.

Целью настоящей работы является проведение исследований по проверке выдвинутой гипотезы и определению значения α , при котором выполняются требования нормативной документации [2].

Таблица 1 – Технические характеристики устройств автоматического регулирования температуры

Фирма-изготовитель	Диаметр условного прохода, мм	Коэффициент гидравлического сопротивления
1	2	3
Смоленский НИИ Теплоприбор, Россия	15, 20	8
Braukmann, Германия	15, 20	5
Heimeier, Германия	10, 20	14,6
MNG, Германия	10, 20	13,5
MMG, Венгрия	10, 20	11,7
Termatik, Италия	10, 20	8,8
MMG AM, Венгрия	10, 20	9,3
Herz, Германия	10, 20	5
Osy OY, Финляндия	10, 20	8,8
Mertik, Германия	10, 20	6
Danfoss, Дания	15, 20	5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В УСТРОЙСТВЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для проведения исследования влияния угла наклона перегородки α на значение коэффициента гидравлического сопротивления ζ разработана модель движения потока теплоносителя в устройстве регулирования (рис. 1). При этом поток теплоносителя разделен на 7 участков, а для определения суммарного значения ζ предложено выражение:

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 + \zeta_5 + \zeta_6 + \zeta_7, \quad (1)$$

где $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6, \zeta_7$ – значения коэффициентов гидравлического сопротивления на участках, соответственно, первого постепенного сужения, второго постепенного сужения, плавного поворота, резкого поворота, резкого сужения, первого плавного расширения и второго плавного расширения.

Для расчета значений коэффициентов гидравлического сопротивления при сужениях, поворотах и расширениях потока воспользуемся базовыми выражениями из [3], определив значения входящих в них величин из предложенной модели движения потока теплоносителя в устройстве регулирования (рис. 1).

Значение коэффициента ζ_1 гидравлического сопротивления на участке первого постепенного сужения потока теплоносителя до высоты h_1 определим из выражения:

$$\zeta_1 = \eta_1(\alpha) \cdot \left(1 - \frac{S_1(\alpha)}{F}\right), \quad (2)$$

где $\eta_1(\alpha)$ – коэффициент смягчения входа, определяемый по таблице [3] в зависимости от конструктивных параметров устройства (применительно к рассматриваемой конструкции получено выражение $\eta_1(\alpha) = -0,01\alpha + 0,514$);

$F = 0,25\pi \cdot D^2$ – площадь сечения устройства до сужения;

$$S_1(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(1 - \frac{2h_1(\alpha)}{D_{\text{по}}} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(1 - \frac{2h_1(\alpha)}{D_{\text{по}}} \right) \right) \right] - \text{площадь сечения}$$

устройства после первого сужения.

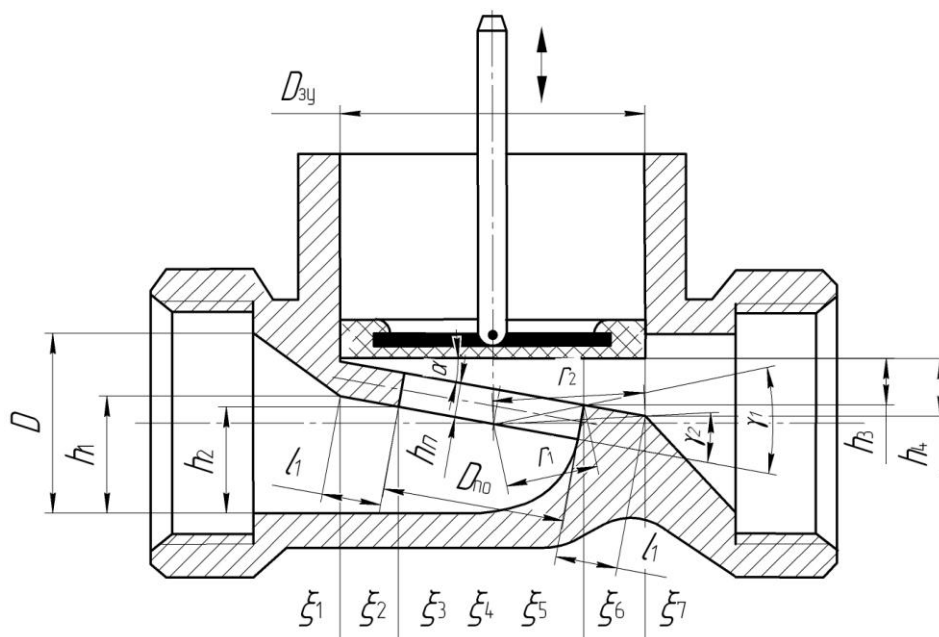


Рисунок 1 - Модель движения потока теплоносителя в устройстве контроля и регулирования

D - диаметр трубопровода до сужения (в данной конструкции $D = 20$ мм); $D_{по}$ - диаметр проходного отверстия ($D_{по} = 20$ мм); $D_{зy}$ - диаметр запорного устройства ($D_{зy} = 30$ мм); h_1 - высота, до которой происходит первое сужение потока теплоносителя; h_2 - высота, до которой происходит второе сужение потока теплоносителя; h_3 - высота, от которой начинается первое плавное расширение пока теплоносителя; h_4 - высота, от которой начинается второе плавное расширение пока теплоносителя; h_n - толщина перегородки регулирующего органа; l_1 - ширина посадочного места под запорное устройство; r_1 - радиус поворота малого диаметра посадочной поверхности наклонной перегородки регулирующего органа при моделировании изменения α ; r_2 - радиус поворота большого диаметра посадочной поверхности наклонной перегородки регулирующего органа при моделировании изменения α ; γ_1 и γ_2 - конструктивные параметры перегородки

Из рис. 1 видно, что высоту h_1 можно определить по формуле:

$$h_1(\alpha) = 0,5D + (l_1 + 0,5D_{по}) \cdot \sin(\alpha),$$

где $l_1 = 0,5(D_{зy} - D_{по})$.

Таким образом:

$$h_1(\alpha) = 0,5(D + D_{зy} \sin(\alpha)). \quad (3)$$

С учетом преобразований площадь сечения устройства после первого сужения определяется из выражения:

$$S_1(\alpha) = 0,125 \cdot D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{-D_{зy} \sin(\alpha)}{D_{по}} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{-D_{зy} \sin(\alpha)}{D_{по}} \right) \right) \right]. \quad (4)$$

Коэффициент ζ_2 гидравлического сопротивления на участке второго постепенного сужения потока теплоносителя определим по формуле, аналогичной (2):

$$\zeta_2 = \eta_1(\alpha) \cdot \left(1 - \frac{S_2(\alpha)}{S_1(\alpha)} \right), \quad (5)$$

где $S_2(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(1 - \frac{2h_2(\alpha)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(1 - \frac{2h_2(\alpha)}{D} \right) \right) \right]$ - площадь сечения устройства регулирования после второго сужения.

Из рис. 1 видно, что высоту h_2 можно определить по формуле:

$$h_2(\alpha) = 0,5D + 0,5D_{\text{по}} \sin(\alpha). \quad (6)$$

Таким образом, после преобразований площадь сечения устройства регулирования после второго сужения определяется из выражения:

$$S_2(\alpha) = 0,125 \cdot D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{-D_{\text{по}} \sin(\alpha)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{-D_{\text{по}} \sin(\alpha)}{D} \right) \right) \right]. \quad (7)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ_3 на участке плавного поворота потока теплоносителя определяется из выражения:

$$\zeta_3(\alpha) = \left[0,131 + 0,16 \cdot \left(\frac{D_{\text{по}}}{R} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{90 - \alpha}{90}. \quad (8)$$

где R – радиус поворота потока теплоносителя (из конструктивных соображений в предложенном устройстве выполняется условие $R = 0,65h_2(\alpha)$).

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ_4 на участке резкого поворота определяется из выражения:

$$\zeta_4(\alpha) = \left[\sin \left(\frac{90 - \alpha}{2} \right) \right]^2 + 2 \left[\sin \left(\frac{90 - \alpha}{2} \right) \right]^4. \quad (9)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ_5 при резком сужении в процессе резкого поворота определяется по формуле:

$$\zeta_5(\alpha) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{4S_3(\alpha)}{\pi(D_{\text{по}})^2} \right), \quad (10)$$

где $S_3(\alpha) = F - S_{\text{н1}}(\alpha) - S_{\text{в1}}(\alpha)$ – площадь сечения устройства после данного сужения, причем $S_{\text{н1}}(\alpha)$ и $S_{\text{в1}}(\alpha)$ – площади нижнего и верхнего сегментов, отсекаемые высотой h_3 , для определения которых с учетом рекомендаций [3] предлагаются следующие зависимости:

$$S_{\text{н1}}(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{-2r_1 \cdot \sin(\alpha - \gamma_1)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{-2r_1 \cdot \sin(\alpha - \gamma_1)}{D} \right) \right) \right]; \quad (11)$$

$$S_{\text{в1}}(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{2r_1 \cdot \sin(\alpha - \gamma_1) - h_3(\alpha)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{2r_1 \cdot \sin(\alpha - \gamma_1) - h_3(\alpha)}{D} \right) \right) \right], \quad (12)$$

где $\gamma_1 = \arctg \left(\frac{h_{\text{п}}}{0,5D_{\text{по}}} \right)$ (рис. 1);

$$r_1 = \sqrt{0,25D_{\text{по}}^2 + h_{\text{п}}^2};$$

$h_{\text{п}}$ – толщина перегородки регулирующего органа (принимается равной $4 \cdot 10^{-3}$ м);

$$h_3(\alpha) = (D_{\text{по}} + l_1) \sin(\alpha).$$

Коэффициент ζ_6 гидравлического сопротивления на участке первого плавного расширения потока теплоносителя рассчитывается по формуле:

$$\zeta_6(\alpha) = \zeta_{P_1}(\alpha) + \zeta_{T_1}(\alpha), \quad (13)$$

где $\zeta_{P_1}(\alpha)$ и $\zeta_{T_1}(\alpha)$ – составляющие, определяемые выражениями:

$$\zeta_{P_1}(\alpha) = \theta_{P_1} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_1(\alpha)} \right)^2; \quad (14)$$

$$\zeta_{T_1}(\alpha) = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin(0,5\alpha)} \cdot \frac{n_1^2(\alpha) - 1}{n_1^2(\alpha)}, \quad (15)$$

где $\theta_{P_1}(\alpha) = 3,2K \cdot [\operatorname{tg}(0,25\alpha)]^{1,25}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности устройства регулирования [3];

K – коэффициент, учитывающий расширение потока теплоносителя (согласно рекомендациям [3] принимаем $K = 1$);

$$n_1(\alpha) = S_4(\alpha)/S_3(\alpha);$$

$S_4(\alpha) = F - S_{H_2}(\alpha) - S_{B_2}(\alpha)$ – площадь, с которой начинается второе плавное расширение потока теплоносителя;

λ – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и степени шероховатости (при ламинарном течении движения потока для $Re_D = 2300$ принимаем $\lambda = 0,028$ [3]), причем $S_{H_2}(\alpha)$ и $S_{B_2}(\alpha)$ – площади нижнего и верхнего сегментов, отсекаемые высотой h_4 и определяемые по аналогии с (9) и (10) по формулам:

$$S_{H_2}(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{-2r_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma_2)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{-2r_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma_2)}{D} \right) \right) \right];$$

$$S_{B_2}(\alpha) = 0,125D^2 \cdot \left[\frac{\pi}{90} \left(\arccos \left(\frac{2r_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma_2) - h_4(\alpha)}{D} \right) \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{2r_2 \cdot \sin(\alpha - \gamma_2) - h_4(\alpha)}{D} \right) \right) \right],$$

$$\text{где } \gamma_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_n}{0,5D_{no} + l_1} \right); \quad r_2(\alpha) = \sqrt{(0,5D_{no} + l_1)^2 + h_n^2}; \quad h_4(\alpha) = (D_{no} + 2l_1)\sin(\alpha).$$

Коэффициент ζ_7 гидравлического сопротивления на участке второго плавного расширения потока теплоносителя определяется аналогичным образом:

$$\zeta_7(\alpha) = \zeta_{P_2}(\alpha) + \zeta_{T_2}(\alpha), \quad (16)$$

$$\zeta_{P_2}(\alpha) = \theta_{P_2} \cdot \left(1 - \frac{1}{n_2(\alpha)} \right)^2, \quad (17)$$

$$\zeta_{T_2}(\alpha) = \frac{\lambda}{8 \cdot \sin[0,25(\alpha + \gamma_2)]} \cdot \frac{n_2^2(\alpha) - 1}{n_2^2(\alpha)}, \quad (18)$$

где $\theta_{P_2}(\alpha) = 3,2K \cdot [\operatorname{tg}(0,25(\alpha + \gamma_2))]^{1,25}$;

$$n_2(\alpha) = F/S_4(\alpha).$$

Подставив (2), (5), (8), (9), (10), (13), (16) в формулу (1), получим выражение для определения общего коэффициента гидравлического сопротивления устройства в зависимости от угла α наклона его перегородки:

$$\zeta = \eta_1(\alpha) \cdot \left(2 - \frac{S_1(\alpha)}{F} - \frac{S_2(\alpha)}{S_1(\alpha)} \right) + \left[0,131 + 0,16 \cdot \left(\frac{D_{no}}{R} \right)^{3,5} \right] \cdot \frac{90 - \alpha}{90} + \left[\sin \left(\frac{90 - \alpha}{2} \right) \right]^2 +$$

$$+ 2 \left[\sin \left(\frac{90 - \alpha}{2} \right) \right] + 0,5 \cdot \left(1 - \frac{4S_3(\alpha)}{\pi(D_{no})^2} \right) + \theta_{P_1} \cdot \left(1 - \frac{S_3(\alpha)}{S_4(\alpha)} \right)^2 + \frac{\lambda}{8 \cdot \sin(0,5\alpha)} \cdot \frac{S_4^2(\alpha) - S_3^2(\alpha)}{S_4^2(\alpha)} + (19)$$

$$+ \theta_{P_2} \cdot \left(1 - \frac{S_4^2(\alpha)}{F} \right)^2 + \frac{\lambda(F^2 - S_4^2(\alpha))}{8F^2 \cdot \sin[0,25(\alpha + \gamma_2)]}.$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления регулирующего органа от угла наклона перегородки $\xi = f(\alpha)$, полученная из разработанной модели (19) с учетом (4), (7), (11) – (15), (17), (18) для числовых значений конструктивных параметров устройства согласно рис. 1.

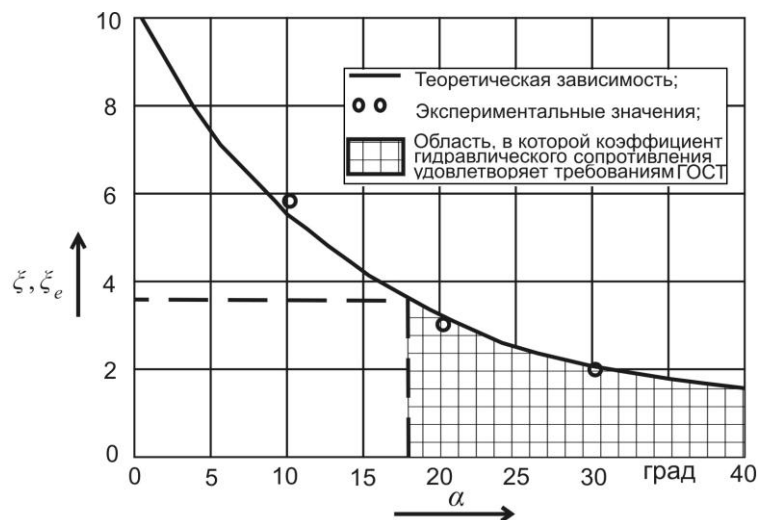


Рисунок 2 - Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Анализ полученной зависимости иллюстрирует правомочность выдвинутой гипотезы о снижении коэффициента гидравлического сопротивления регулирующего органа при увеличении угла наклона перегородки. При этом возникает возможность определения области значений α , обеспечивающих выполнение требований [2] к значению ξ . Условие $\xi \leq 3,5$ выполняется при $\alpha \geq 17^\circ$.

В соответствие с конструкцией устройства контроля и регулирования температуры [1] разработаны его макеты со значениями угла наклона перегородки α : 10° , 20° и 30° . Проведены испытания макетов в лаборатории МПП ВКХ «Орелводоканал». Экспериментально полученные значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ_e составили, соответственно, 5,76; 2,95; 1,89, что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований (рис. 2).

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель движения потока теплоносителя в устройстве регулирования с наклонной перегородкой и получена теоретическая зависимость коэффициента гидравлического сопротивления устройства от угла наклона перегородки.
2. На основании теоретических исследований обоснована область значений угла наклона перегородки регулирующего устройства, в пределах которой выполняются требования нормативной документации к коэффициенту гидравлического сопротивления.
3. Проведены экспериментальные исследования макетов устройства контроля и регулирования с наклонной перегородкой, подтвердившие правомочность заложенной в его основу гипотезы и адекватность предложенной модели.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Патент № 2302031 РФ, МКИ G 05 D 23/02. Регулятор температуры [Текст]/ С.А. Чистович, С.П. Петров, А.И. Суздальцев, О.С. Петрова. – Опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.

2 ГОСТ 10944-75. Краны регулирующие для нагревательных приборов систем водяного отопления зданий [Текст]. – М.: Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства, 1976.

3 Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры [Текст]/ Д.Ф. Гуревич - Л.: Машиностроение, 1981. – 832 с.

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук
Тел. (4862)419876
E-mail: pms35@mail.ostu.ru

Степанов Юрий Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук

Петрова Ольга Сергеевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант

УДК 620.179.11:629.3-192

Е.В. ПАХОЛКИН, Н.Н. ФОКИН

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ
МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
ПО ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫМ СВОЙСТВАМ**

Решаются прикладные задачи оптимизации условий диагностирования показателей качества моторных масел. Представлены результаты экспериментальных исследований. Доказана возможность применения подшипника качения в качестве устройства для функционального диагностирования моторных масел.

The applied problems of optimization of conditions for diagnosing of quality parameters of engine oils are solving. Results of experimental researches are presented. The opportunity of application of the bearing as the device for functional diagnosing of engine oils is proved.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В работах [1-3] показана возможность использования теории электрических методов контроля трибосопряжений для реализации функционального диагностирования смазочных материалов (СМ) и, в частности, моторных масел (ММ). Теоретически обосновано [2, 3], что диагностический параметр НИВ обладает высокой чувствительностью к изменению условий смазки трибосопряжения, которые, в свою очередь, зависят от ряда факторов, в том числе, от вязкости СМ. Данное свойство масел является важнейшим нормируемым показателем их качества, но в качестве диагностического признака более целесообразно использовать индекс вязкости, который отражает характер изменения вязкости ММ в зависимости от температуры.

Для исследования вязкостно-температурных свойств ММ в соответствии с разрабатываемой методикой требуется внести СМ в трибосопряжение, обеспечить приработкой стабилизацию режима смазки, создать искусственно приращение температуры трибосопряжения и оценить приращение диагностического параметра НИВ, которое, как показано в [3], зависит от текущего значения индекса вязкости.

Для практической реализации метода необходимо решить следующие задачи:

- выбрать тип трибосопряжения для реализации функционального диагностирования ММ;
- обосновать необходимое количество ММ (объем пробы);
- исследовать характер процессов стабилизации режима смазки для выбранного типа трибосопряжения с целью установления времени, требуемого для диагностирования пробы ММ.

Необходимо отметить, что поставленные задачи эффективно могут быть решены именно в рамках экспериментальных исследований. Например, в работах [4, 5] дана теоретическая оценка применения четырехшариковой схемы трения для решения рассматриваемой задачи, в работе [1] дано описание исследований с использованием подшипника качения, а в работе [2] приведены результаты теоретических исследований, выполненных для схемы трения «шарик-кольцо».

Независимо от схемы трения во всех случаях показана связь диагностического параметра с исследуемым свойством ММ. Тем не менее, очевидным является тот факт, что результаты математического моделирования и теоретических исследований имеют ограниченную достоверность, так как в моделях контактно-гидродинамических процессов и процессов электрического контактирования невозможно учесть абсолютно все влияющие факторы. При этом каждая из рассмотренных схем трения имеет свои недостатки. Например, в случае четырехшариковой схемы требуется значительный объем пробы ММ, а уровень параметра НИВ в силу характера трения достаточно высокий, то есть невозможно использовать в эксперименте весь динамический диапазон параметра НИВ.

Использование схемы трения «шарик-кольцо», наиболее удобной в применении, связано со сложностью конструктивной реализации испытательного оборудования, так как, с одной стороны, необходимо реализовать качение шарика по кольцу, а с другой стороны, шарик находится в контакте с элементом нагружения. Таким образом, сложно прогнозировать реальное соотношение качения и проскальзывания в рассматриваемой схеме трения. Следовательно, расхождение между результатами математического моделирования и экспериментальными исследованиями также могут быть существенными, возможно отсутствие воспроизводимости результатов диагностирования.

Использование подшипника качения в качестве трибосопряжения, в котором реализуется функциональное диагностирование ММ, также сопряжено с недостатками. В частности, подшипник, являясь сравнительно сложной конструкцией, требует большего количества расходных материалов для его промывки перед каждой операцией диагностирования. Кроме того, в ряде случаев требуется длительное время на стабилизацию режима трения в подшипнике, что показано, например, в работах В.В. Мишина и В.В. Маркова (ОрелГТУ). Последний недостаток будет сдерживать внедрение и широкое использование разрабатываемой технологии диагностирования ММ. В частности, ограничивается возможность применения метода для реализации экспресс-диагностики ММ в качестве потенциальной услуги служб автомобильного сервиса.

Наконец, необходимо отметить, что используемые математические модели фрикционного контакта не позволяют априорно (расчетным путем) установить, например, оптимальное количество СМ по таким критериям, как время стабилизации режима смазки и уровень диагностического параметра на момент завершения приработки. Невозможно также прогнозировать и само время стабилизации условий смазки. Таким образом, поставленные задачи исследования эффективно могут быть решены именно экспериментальным путем.

Описание экспериментальных исследований. В работе [1] для исследования влияния температуры на изменения в характере смазки трибосопряжения использовался подшипник качения 113. Исходя из представлений о классических схемах трения, используемых в разнообразных машинах трения и прочих устройствах трибологии [6, 7], данный подход является не совсем обычным. Тем не менее, его нельзя назвать и оригинальным. Например, в работе [8] подшипник качения использовался как устройство для оценки реологических и химических свойств СМ. При этом в качестве достоинства данного подхода отмечается, что

результаты исследований получены именно для реальных условий трения, которые ограниченно воспроизводятся с помощью многих стандартных испытательных средств.

Недостатком такого выбора является не только повышенный расход материалов, необходимых для очистки рабочих поверхностей подшипника перед диагностированием пробы СМ, причем этот недостаток не является существенным при использовании малогабаритных подшипников. Основная проблема заключается в том, что авторам не удалось найти опубликованных работ, которые бы систематизировали информацию о времени приработки (стабилизации режима трения) и факторах, которые определяют это время.

Для подшипников качения характерен сложный процесс самоорганизации смазочного материала и взаимодействующих поверхностей. Основываясь на понятии приработки деталей трибосопряжения [9], гипотетически можно утверждать, что для минимизации времени, необходимого для стабилизации режима смазки, целесообразно использовать малогабаритные приборные подшипники качения, в которых реализуется пятно контакта с меньшей площадью.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы подшипники качения 6900 (1000900). На рис. 1 показаны результаты измерения диагностического параметра НИВ, полученные в процессе приработки трех подшипников из одной партии. Частота вращения внутреннего кольца подшипника составляла 2700 мин^{-1} , нагрузка – 150 Н.

Анализ представленных на рисунках результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при смазывании подшипника ММ в количестве от 10 до 110 мкл (примерно от 1 до 11 каплей ММ типа М-8) заметной корреляции между объемом ММ и временем стабилизации режима смазки не наблюдается;
- при смазывании подшипника ММ в количестве от 10 до 110 мкл заметной корреляции между объемом ММ и уровнем параметра НИВ также не наблюдается;
- время стабилизации условий смазки для одного и того же подшипника составляет от 5 до 60 мин.

Для объяснения плохой воспроизводимости характера приработки подшипника была выдвинута гипотеза, что причиной является неоптимальный объем ММ, а именно, его избыток. Данный фактор приводит к нестабильному характеру трения деталей подшипника: наряду с трением качения наблюдается проскальзывание, причем соотношение между данными видами трения не является стабильным от эксперимента к эксперименту даже в одном и том же подшипнике. На диаграммах рис. 1 можно отметить, в частности, что при полном погружении подшипника в ММ (эквивалентно объему 110 мкл) наблюдается самый высокий уровень параметра НИВ ($10^{-2} - 10^{-3}$), непригодный для постановки эксперимента по исследованию вязкостно-температурных свойств СМ.

Для проверки гипотезы были проведены дополнительные серии экспериментов с меньшими объемами СМ. Типичные результаты этих исследований показаны на рис. 2.

Рис. 3 отражает связь объема СМ в подшипнике с уровнем диагностического параметра на момент стабилизации режима смазки.

Анализ характера изменения диагностического параметра в процессе приработки подшипника (рис. 2) позволяет сделать вывод, что гипотеза о влиянии избыточного количества СМ на характер трения в подшипнике обладает достоверностью. Оптимизация объема СМ приводит к стабилизации характера трения деталей подшипника, что приводит и к ускорению процесса приработки, и к улучшению условий смазки, подтверждаемому низким уровнем диагностического параметра. Как следует из рис. 2, при смазывании рабочих поверхностей деталей подшипника маслом в объеме всего 2,5 мкл среднее значение НИВ уже на 4-ой минуте эксперимента составляет 10^{-6} , а для экспериментов, показанных на рис. 1, это время составляло в лучшем случае 15-20 мин.

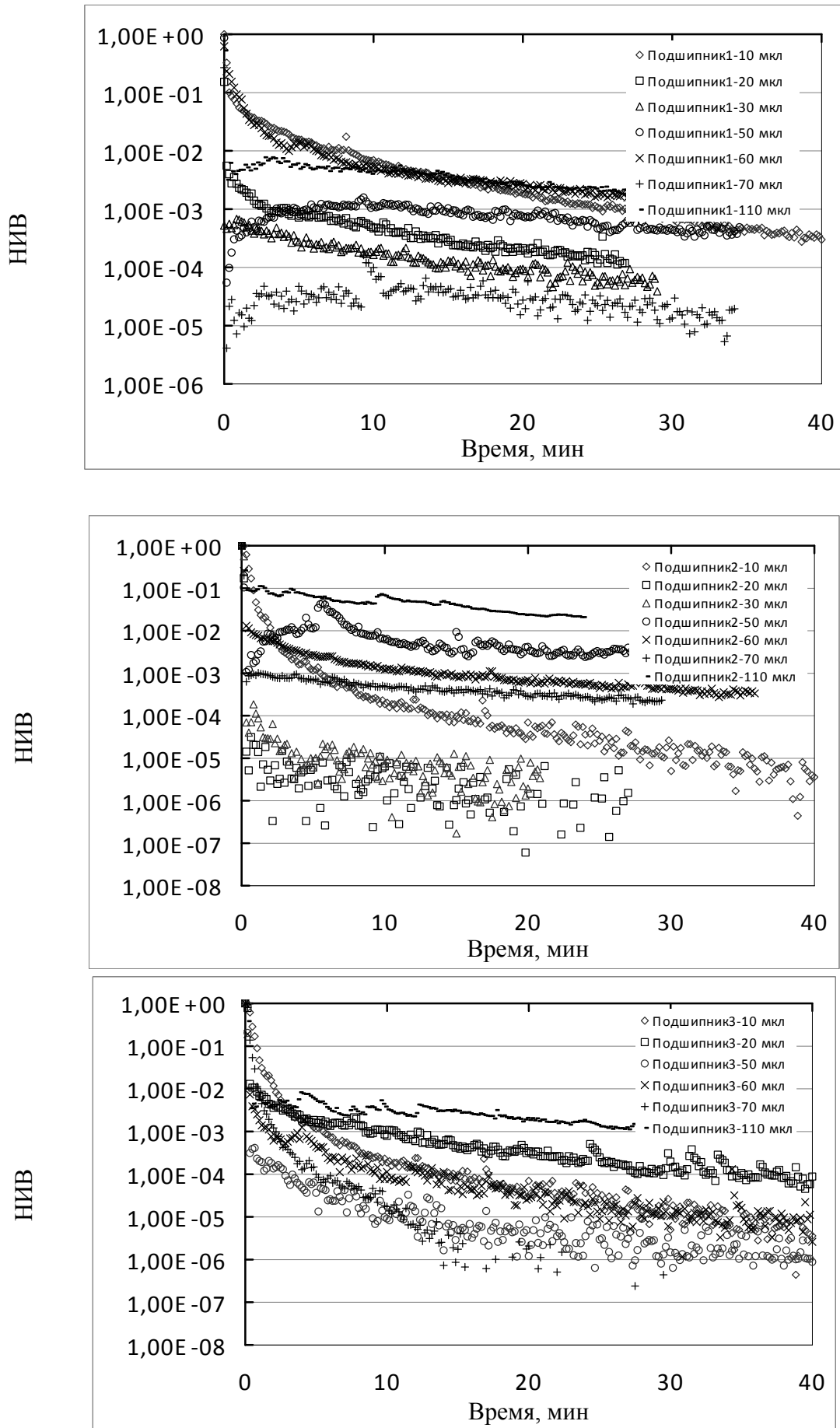


Рисунок 1 - Результаты мониторинга процесса приработки подшипников

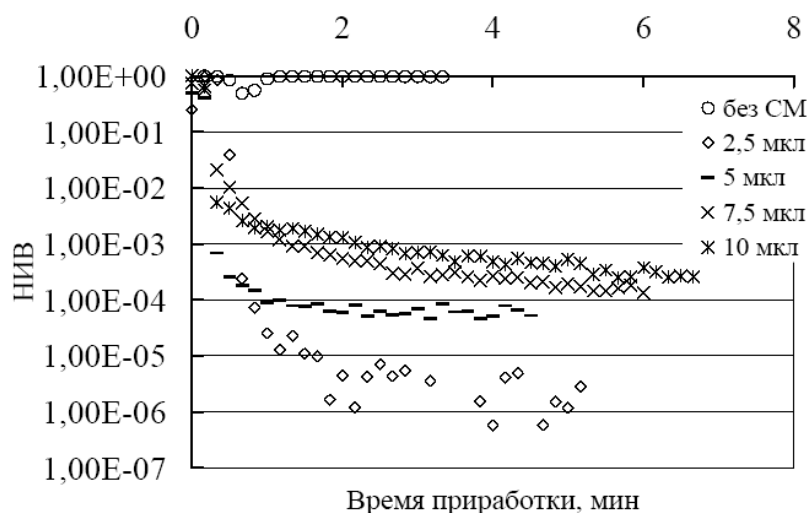


Рисунок 2 - Результаты мониторинга процесса приработки подшипника при объемах СМ до 10 мкл

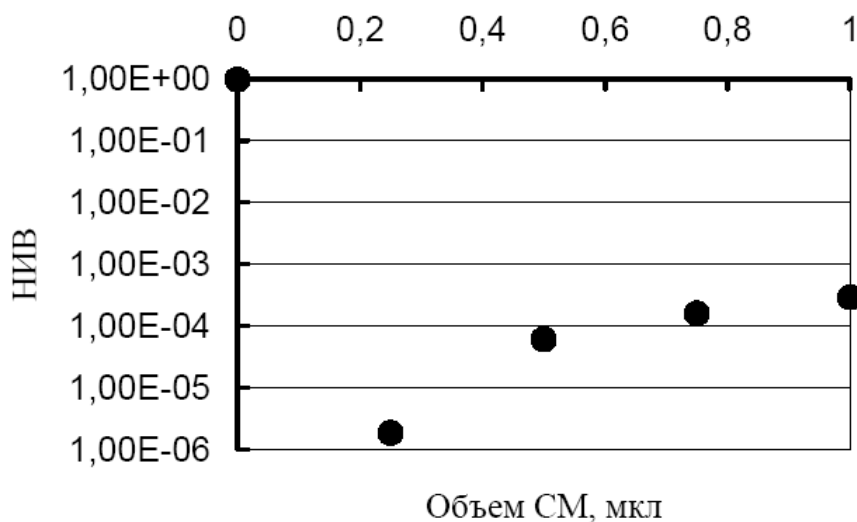


Рисунок 3 - Зависимость уровня НИВ в установившемся режиме смазки подшипника от объема СМ

В качестве критерия окончания процесса приработки (стабилизации условий смазки в подшипнике) использовалось следующее условие:

$$\Delta K \geq \Delta K_{T_{\text{эксн}}}, \quad 1)$$

где ΔK – погрешность оценки вероятности электрического контактирования в подшипнике по параметру НИВ;

$\Delta K_{T_{\text{эксн}}}$ – изменение среднего значения параметра НИВ за время эксперимента $T_{\text{эксн}}$ [10].

$$\Delta K = t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{1-K}{K \cdot N}}, \quad 2)$$

где K – уровень НИВ;

t_{β} – функция доверительной вероятности β ;

N – отношение времени измерения параметра к периоду импульсов заполнения (конструктивный параметр измерительного устройства).

С использованием принятого критерия можно утверждать, что при оптимизации объема СМ время стабилизации режима смазки подшипника 6900 не превышает 10 мин. Типовое значение – 5 мин.

ВЫВОДЫ

На основании результатов исследований и с учетом имеющегося опыта [8] можно утверждать, что подшипник качения может эффективно использоваться в разноплановых трибологических исследованиях СМ и, в частности, пригоден в качестве трибосопряжения для реализации функционального диагностирования ММ по вязкостно-температурным свойствам.

Выбор малогабаритного приборного подшипника обеспечивает минимизацию времени, требуемого на стабилизацию режима смазки. При условии оптимизации объема СМ длительность всего эксперимента гарантированно может быть уменьшена до 10 мин. (что меньше времени измерения вязкости на стандартных вискозиметрах).

Неоспоримым достоинством предлагаемого метода является минимальный объем ММ, требуемый для анализа его вязкостно-температурных свойств. Пробы объемом порядка 10 мкл могут сколь угодно часто отбираться из картера автомобиля с целью мониторинга состояния масла. Это создает предпосылки для разработки технологии экспресс-контроля ММ в процессе их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахолкин, Е.В. Исследование возможности контроля показателей качества смазочных материалов электрическим методом [Текст] // Контроль. Диагностика.– 2004. – № 9.
2. Пахолкин, Е.В. Обоснование критерия интерпретации результатов измерения диагностического параметра НИВ при исследовании вязкостно-температурных характеристик моторных масел [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2007, №2. – С. 130-134.
3. Пахолкин, Е.В. Совместное использование диагностического параметра НИВ и индекса вязкости при контроле качества всесезонных моторных масел [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. науч. тр./ Под ред. В.Н. Латышева. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2007. Вып. 6. – С. 50-54.
4. Пахолкин, Е.В. Исследования возможности применения параметров электрического микроконтактирования при использовании четырехшариковой машины трения [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Гидродинамическая теория смазки – 120 лет: Труды Международного научного симпозиума. В 2-х томах. Т. 2 – М.: Машиностроение-1, Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 338 – 342.
5. Пахолкин, Е.В. Применение четырехшариковой схемы трения для оценки вязкостно-температурных характеристик смазочных материалов электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин, Н.Н. Фокин // Известия ОрёлГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение, 2006, № 1. – С. 39-41.
6. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах [Текст]: учеб. для вузов/ П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374 с.: ил.
7. Пахолкин, Е.В. Инструментальные проблемы исследований физико-механических процессов в зонах трения трибосопряжений [Текст]/ Е.В. Пахолкин, Н.А. Сотникова. - Известия ОрелГТУ. Серия «Машиностроение. Приборостроение». – Орел, ОрелГТУ, 2003.
8. The ball bearing as a Theological test device. Kingsbury E, P. <Dev. Numer. and Exp. Meth. Appl. Tribol. Proc. 10 th Leeds-Lyon Symp. Tribol., Lyon, 6 th—9 th Sept., 1983>. London e. a., 1984, 41—45. Discuss., 46—51.

9. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

10. Пахолкин, Е.В. Приборы для трибомониторинга [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Датчики. Системы. 2008, №3. – С. 16-19.

Пахолкин Евгений Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
Тел. (4862) 419876, факс (4862) 416684
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Фокин Николай Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант

УДК 621.383.(088.8)

Д.Ю. БАГРИНЦЕВ, Ю.Б. ИВАНОВ

ФОТОДАТЧИКИ ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Для линейного преобразования механических перемещений в электрические сигналы предложено устанавливать перед фотодиодами экраны с отверстиями треугольной или прямоугольной формы и повышать чувствительность фотодатчиков за счет применения усилителей с разными цепями обратной связи по постоянному и переменному току при включении фотодиода между входами усилителя.

For linear transformation of mechanical movings to electric signals it is offered in front of photo diodes to establish screens with apertures of the triangular or rectangular form, and to raise sensitivity of photo gauges applying of amplifiers with different circuits of a feedback on direct and alternating current at connection of the photo diode directly between inputs of the amplifier.

При автоматизированном контроле длины и скорости движения механических изделий и проведении вибрационных испытаний строительных конструкций предъявляется ряд специфических требований к средствам преобразования перемещений в электрический сигнал, в качестве которых часто используют диодные фотодатчики и оптические пары «светодиод-фотодиод». К основным требованиям относятся: простота и надежность конструкции датчиков, широкий диапазон преобразования, высокая чувствительность и помехозащищенность, бесконтактность измерения и универсальность применения, позволяющая их использовать для проведения испытаний различного вида. Всем этим требованиям в наибольшей степени соответствуют фотоэлектрические преобразователи, позволяющие реализовать контроль механических параметров двумя способами: при установке контролируемого изделия между источником и приемником светового излучения или при отражении светового луча от исследуемого изделия с односторонним размещением источника и приемника излучения.

В большинстве случаев практически требуется обеспечивать высокую линейность измерительной характеристики и повышать чувствительность преобразования, напрямую влияющих на разрешающую способность и точность аппаратуры контроля, от стабильности которых в конечном итоге зависит качество выпускаемой продукции. При использовании фотодатчиков погрешность нелинейности зависит от двух составляющих – от линейности световой характеристики фотодиода и от пропорционального преобразования механических параметров контролируемого изделия в модуляцию светового потока.

Высокая чувствительность фотоэлектрического преобразования обеспечивается двумя способами: увеличением яркости светового излучения, например, при работе источника света в импульсном режиме, и повышением обратного напряжения фотодиода в приемнике излучения до уровня $U_{обр} \geq 100$ В при его работе в фотодиодном режиме [1]. Форсирование токовой накачки светодиодного излучателя и увеличение обратного напряжения фотоприемника используется также для расширения динамического диапазона измерения и повышения разрешающей способности приборов контроля.

Однако повышение обратного напряжения фотодиода приводит к увеличению его темнового тока как вследствие большого напряжения $U_{обр}$, так и из-за дополнительного нагрева фотодиода его большой мощностью рассеяния. При этом также возможно изменение светового потока из-за нагрева светового излучателя при его накачке большим током. Например, повышение рабочей температуры светодиода типа АЛ107Б приводит к ослаблению его излучения со скоростью более 0,2% /°C [2].

Вторая составляющая погрешности связана с нелинейностью преобразования механических перемещений в модуляцию светового потока. Как правило, для этой цели применяют «оптические клинья», при изготовлении которых используют фотопленку с неравномерной засветкой по длине кадра, либо слюдяную основу с металлизированным тонкослойным покрытием линейно изменяющейся толщины [3]. К недостаткам таких светомодулирующих элементов относятся: изменение оптических параметров фотопленки в течение времени из-за частичного разрушения структуры фоточувствительного слоя в результате воздействия окружающей среды, низкие прочностные характеристики фотоосновы, а также сложность изготовления металлических покрытий с равномерно изменяющейся толщиной.

Для повышения точности предлагается изменить конструкцию фотопреобразователей – установить перед фоточувствительными окнами приемников излучения светонепроницаемые экраны с отверстиями треугольной формы – при преобразовании механических перемещений в гармонический сигнал, либо прямоугольной формы – при контроле толщины или частоты вибрации механических изделий.

В качестве источника излучения целесообразно использовать лазерный светодиод с разверткой лазерного луча в узкую полосу света цилиндрической линзой в форме стеклянного стержня. При освещении лазерным лучом одной стороны такого стержня на его противоположной стороне формируется узкая равномерная полоса света, длина которой ограничивается длиной этого стержня. Это позволяет сравнительно просто преобразовать механические перемещения в электрические сигналы.

Для измерения параметров вибрации можно установить перед фоточувствительным окном фотодиода светонепроницаемую пластинку с двумя треугольными отверстиями и сфокусировать между ними полосу лазерного света (рис. 1). При вибрации датчика в направлении, перпендикулярном полоске света, формируется фототок, прямо пропорциональный амплитуде вибрационных колебаний. При этом частота фототока будет в два раза выше частоты механических колебаний контролируемого изделия.

При использовании в приемниках излучения фотодиодов типов ФД-7К или ФД-24К с диаметром фотоприемного окна около 10 мм таким образом можно контролировать механические колебания с амплитудой до 4 мм, что вполне достаточно для контроля вибрации механических конструкций.

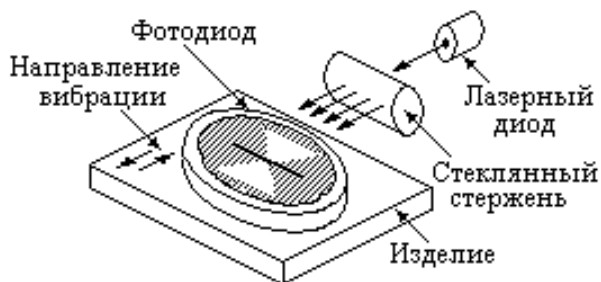


Рисунок 1 – Схема преобразователя для контроля вибрационных колебаний

Для расширения диапазона измерения амплитуды механических колебаний, например, при прочностных испытаниях строительных конструкций, в приемнике светового излучения нужно устанавливать не один, а два фотодиода с отдельными светозащитными экранами, имеющими отверстия треугольной формы (рис. 2, а). Суммирование фототоков, от двух фотодиодов, включенных в электрической схеме приемника светового излучения в противоположных направлениях, позволяет получить двухполярный электрический сигнал, аналогичный по форме механическим колебаниям.

При проведении допускового контроля вибрации промышленного оборудования целесообразно использовать приемник излучения с двумя фотодиодами, прикрытыми светонепроницаемым экраном с двумя отверстиями прямоугольной формы (рис. 2, б). Расстояние Δh между прямоугольными отверстиями на экране приемника излучения задается в зависимости от допустимой по технике безопасности амплитуды вибрации контролируемого оборудования, а узкая полоса лазерного света должна фокусироваться на светозащитном экране между этими прямоугольными отверстиями. Если размах амплитуды механической вибрации в вертикальной плоскости будет превышать зону нечувствительности Δh фотоприемника, то лазерное излучение будет попадать на фоточувствительные окна фотодиодов, изменяя уровень фототока, который можно усилить и использовать для зажигания индикатора, указывающего на превышение допустимой нормы вибрации контролируемого оборудования.

Аналогичный экран с одним прямоугольным отверстием, установленный перед фотодиодом, можно использовать в датчике скорости движения витого провода, например, металлокорда, при его освещении инфракрасным светодиодом, расположенным с другой стороны контролируемого провода (рис. 2, в).

При продольном движении витого провода будет изменяться площадь засветки фоточувствительной поверхности приемника излучения, приводящая к периодической модуляции выходного тока фотодиода, частота которого в этом случае будет прямо пропорциональна скорости движения контролируемого провода и может быть измерена цифровым частотомером.

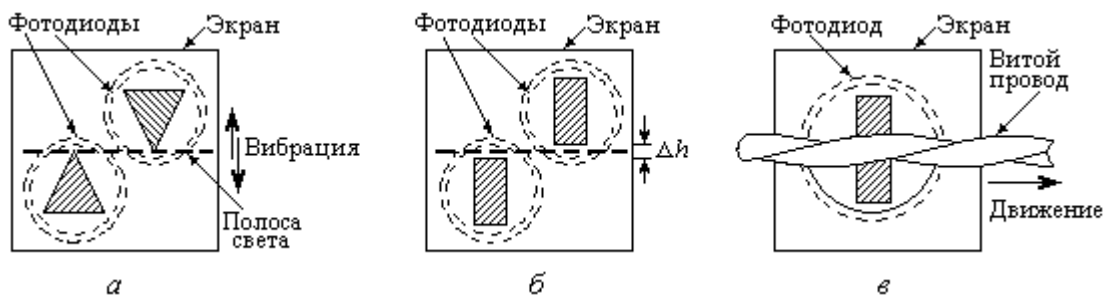


Рисунок 2 – Варианты конструкций фотопреобразователей перемещения

Применение светозащитных экранов перед фотодиодами приводит к уменьшению чувствительности приемников излучения вследствие уменьшения эквивалентной площади фоточувствительной площадки. Для исключения данного недостатка целесообразно использовать в качестве преобразователя фототока в напряжение операционный усилитель с цепью комбинированной обратной связи. В частности, использование отрицательной обратной связи по постоянному току позволяет уменьшить влияние внешней фоновой засветки и температуры эксплуатации на стабильность начального уровня выходного напряжения, а введение цепи положительной обратной связи по переменному току обеспечивает большой коэффициент усиления схемы. Учитывая, что частота механических колебаний при контроле вибрации строительных конструкций обычно не превышает одного килогерца, то в приемниках излучения можно использовать простые операционные усилители, имеющие граничную частоту усиления не более 1 МГц.

Для преобразования переменного фототока в напряжение в приемнике излучения с одним фотодиодом можно использовать схему устройства, показанную на рисунке 3, а. В этой схеме фотодиод VD включен между входами операционного усилителя DA , т. е. работает в режиме короткозамкнутой нагрузки, поэтому падение напряжения на фотодиоде пренебрежимо мало $U_{VD} \approx 0$. На неинвертирующем входе усилителя DA включен резистор R_1 , а в цепи отрицательной обратной связи – резистор $R_2 \approx R_1$. Поэтому постоянное напряжение на выходе усилителя DA зависит только от темнового тока I_T , применяемого фотодиода, и с учетом применяемых резисторов $R_2 \approx R_1$ определяется простым выражением:

$$U_{\text{ВЫХнач}} \approx I_T(R_1 + R_2) \approx 2I_T R_1. \quad (1)$$

Переменная составляющая фототока I_Φ за счет использования элементов R_3, C_1 в цепи положительной обратной связи усилителя DA преобразуется в его выходной сигнал с большим коэффициентом усиления, причем амплитуда выходного напряжения возрастает при уменьшении резистора R_3 , и при выполнении неравенства $R_3 \ll R_1$ определяется приближенным выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx I_\Phi(R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_3) \approx 2I_\Phi R_2(1 + 0,5R_2 / R_3). \quad (2)$$

При выборе резисторов в схеме (рис. 3, а) по условию $R_1 / R_3 \geq 100$ усилитель DA обеспечивает значительное – в $K_U \geq 50$ раз – усиление амплитуды фототока I_Φ по сравнению с темновым током I_T фотодиода VD . В итоге, применение резисторов R_1, R_2, R_3 с относительно небольшими сопротивлениями (не более 100 кОм) позволяет обеспечить хорошую стабильность характеристик фотоприемника в сочетании с его высокой чувствительностью за счет большого усиления переменного фототока.

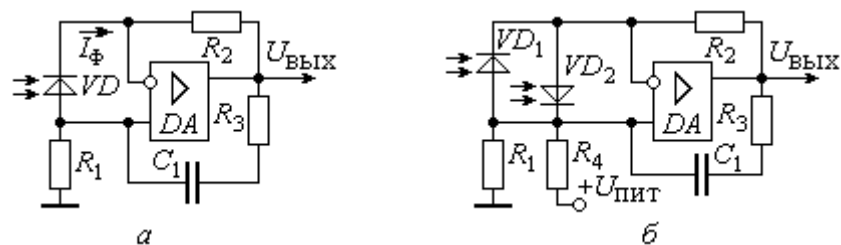


Рисунок 3 – Схемы фотопреобразователей с комбинированной обратной связью

Для преобразования переменного фототока в однополярное напряжение в приемниках светового излучения с двумя фотодиодами целесообразно применять операционные усилители с однополярным питанием, чтобы упростить согласование устройств с цифровыми микросхемами, а также вдвое сократить количество источников питающего напряжения. В схеме однополярного фотопреобразователя (рис. 3, б) на неинвертирующем входе операционного усилителя DA установлен делитель напряжения питания на одинаковых резисторах $R_1 = R_4 = 2R_2$, которыми задается напряжение начального смещения усилителя, составляющее $U_{\text{см}} = U_{\text{пит}} R_1 / (R_1 + R_4) \approx 0,5 U_{\text{пит}} \approx 2,5$ В. В этой схеме оба фотодиода VD_1 и VD_2 работают в короткозамкнутом режиме при напряжениях $U_{VD1} \approx U_{VD2} \approx 0$, поэтому имеют малые темновые токи, причем эти токи частично компенсируются за счет встречного включения фотодиодов.

По аналогии с предыдущей схемой, переменная составляющая фототока I_Φ значительно усиливается за счет применения усилителя DA с положительной обратной связью по переменному току, поэтому выходное напряжение в схеме (рис. 3, б) при

резисторах $R_1 = R_4 = 2R_2 \gg R_3$ определяется формулой (2) и практически эквивалентно выходному напряжению предыдущей схемы фотопреобразователя (рис. 3, а).

При разработке высокочувствительного преобразователя скорости движения витого провода требуется принимать меры для исключения влияния его поперечных биений, возникающих при продольном движении провода между источником и приемником светового излучения. Влияние таких биений значительно ослабляется при установке перед фотоприемником светонепроницаемого экрана с узким отверстием прямоугольной формы, длина которого должна быть больше диаметра провода (рис. 2, в).

Особенность фотоэлектрического контроля скорости протяжки витого провода заключается в том, что относительное изменение диаметра контролируемого металлокорда не превышает 5 – 10%. Это приводит к уменьшению модуляции светового потока, проходящего на фотоприемник излучения, причем глубина модуляции практически зависит от изменения диаметра контролируемых проводов, который лежит в пределах от 1,5 до 5 мм. С учетом данных требований при разработке фотоэлектрического устройства для контроля скорости продольного движения витых проводов необходимо регулировать величину светового потока излучателя в зависимости от амплитуды выходного сигнала фотоприемника, чтобы исключить его насыщение при большой амплитуде механических колебаний и обеспечить высокий коэффициент преобразования переменного фототока низкого уровня. Такое регулирование обеспечивается посредством введения нелинейной обратной связи между источником и приемником излучения.

В схеме фотодатчика, предназначенного для контроля скорости движения витого провода (рис. 4), применены световой излучатель (СИ) на усилителе $D1$ и светодиоде $VD1$, фотоприемник (ФП) на усилителе $D2$ с фотодиодом $VD2$ и формирователь прямоугольных импульсов (ФИ) на логическом элементе $D3$ «Исключающее ИЛИ». Этот элемент выполняет функцию триггера Шмитта за счет применения цепи положительной обратной связи на резисторах R_9, R_{10} и имеет зону гистерезиса $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} R_9/R_{10} \approx 0,2 \text{ В}$.

Малая амплитуда выходного сигнала фотоприемника $U_{\text{вых}} \leq 0,5 \text{ В}$ не влияет на ток, протекающий через светодиод $VD1$ излучателя, который зависит от начального напряжения $U_{\text{нач}} = U_{\text{пит}} R_5/(R_4 + R_5)$ на выходе усилителя $D1$ и ограничивается резистором R_7 на уровне $I_{VD1} \approx 10 \text{ мА}$. При повышении амплитуды выходного напряжения усилителя $D2$ до уровня $U_{\text{вых}} \geq 0,6 \text{ В}$ открывается диод $VD3$, выполняющий совместно с конденсатором C_2 функцию амплитудного детектора, и на усилитель $D1$ поступает сигнал обратной связи, уменьшающий его выходное напряжение и, соответственно, ток светодиода $VD1$.

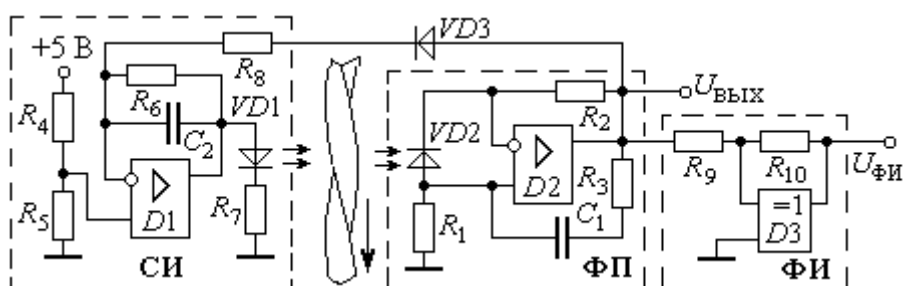


Рисунок 4 – Схема фотодатчика с регулированием светового потока

При экспериментальных исследованиях рассмотренных фотопреобразователей в схемах источников света применялись инфракрасные светодиоды типа АЛ107Б, в фотоприемниках – фотодиоды типа ФД7К с усилителями типа LMP2011, имеющими однополярное напряжение питания, а также с микромощными усилителями КР140УД1208, имеющими низкие входные токи, не превышающие 10 нА. В качестве элемента «Исключающее ИЛИ» в схеме триггера Шмитта использовалась микросхема типа К561ЛП2.

В результате проведенных исследований установлено, что чувствительность фотодиодных преобразователи на усилителях с комбинированной обратной связью составляет 20 ... 50 мВ/мкм при мощности излучения лазерного диода, составляющей 3 ... 4 мВт. При проведении испытаний принимались дополнительные меры конструктивного характера для уменьшения уровня внешней засветки фотодиодов.

При сравнении параметров данных устройств с известными фотодатчиками установлено, что применение усилителей с положительной обратной связью позволяет в 12... 15 раз повысить чувствительность аппаратуры фотоэлектрического контроля при минимальных затратах на ее усовершенствование.

ЛИТЕРАТУРА

1 Иванов, В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы [Текст]: справочник /В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А.М. Юшин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 409 – 414.

2 Загорский, Я. Т. Основы метрологического обеспечения лазерной энергетической фотометрии [Текст]/ Я.Т. Загорский, А.Ф. Котюк. – М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 41 – 44.

3 Коломыцев, В. Н. Размещение магнетронных систем ионного распыления в вакуумных установках [Текст]/ В.Н. Коломыцев. - Радиопромышленность. – М.: 1992. – Вып. 4. – С. 35 – 41.

Д.Ю. Багринцев

Академия ФСО России, г. Орел
Тел. (4862) 419947

Ю.Б. Иванов

Академия ФСО России, г. Орел
Тел. (4862) 419947

УДК 620.17.(088.8)

Н.Г. БОГДАНОВ, С.Н. ЩЕКОТИХИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ НЕМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ВИХРЕВЫМИ ТОКАМИ

Для оценки толщины немагнитных покрытий при контроле изделий целесообразно измерять два параметра - амплитуду и фазу возбуждающего сигнала, подаваемого на контролируемое изделие, и по результатам обработки определять его параметры.

For an estimation of thickness of nonmagnetic coatings at the control of products it is expedient to measure two parameters – amplitude and a phase of a target signal the converter placed in a zone of the control, and to define by results of their processing parameters of a product.

Контроль толщины немагнитных покрытий вихретоковым методом необходим для повышения качества различных изделий с защитным покрытием, в том числе полупроводниковых компонентов. Точность измерения покрытий микронной толщины зависит как от применяемого способа вихретокового преобразования, так и от схемотехнических приемов построения аппаратуры и методов аналого-цифровой обработки сигналов, реализуемых на современной микроэлектронной базе.

Для повышения чувствительности вихретоковых преобразователей целесообразно использовать автогенераторный способ измерения, основанный на включении обмотки вихретокового датчика в высокодобротный LC-контур. В таких генераторах целесообразно в

качестве активных элементов применять цифровые КМОП микросхемы, которые имеют бесконечно большое входное сопротивление, позволяющее обеспечить высокую добротность и, как следствие, высокую чувствительность преобразователей.

С учетом данного положения для проведения экспериментальных исследований использован генераторный принцип построения вихретоковых датчиков, т. е. преобразователь с индуктивностью L_1 подключался к цепи обратной связи высокочастотного генератора импульсов на быстродействующих логических элементах (рис. 1). Для измерения резонансной частоты колебаний f_p применялся цифровой частотомер.

Практическая схема генератора прямоугольных импульсов реализована на быстродействующем КМОП логическом элементе D1.1 типа «Триггер Шмитта» серии КР1554ТЛ1 с буферным инвертором D1.2 на выходе, исключаяющим влияние емкости нагрузки на стабильность частоты колебаний. Вихретоковый преобразователь с эквивалентной индуктивностью обмотки L_1 и конденсатор переменной емкости C_1 образуют последовательный колебательный контур, резонансная частота которого регулируется в диапазоне $f_p = (1 \dots 25)$ МГц конденсатором C_1 и определяемая выражением [1]:

$$f_p = 1/(2\pi\sqrt{L_1 C_1})$$

Применение КМОП микросхем с большим входным сопротивлением ($R_{BX} \rightarrow \infty$) позволяет обеспечить высокую добротность ($Q > 100$) и высокую фазовую чувствительность $L_1 C_1$ -контра при сравнительно малых аппаратных затратах (1/3 корпуса микросхемы КР1554ТЛ1) [2].

К особенностям схемы данного вихретокового преобразователя генераторного типа относятся:

- резистором $R_1 \approx 240$ Ом ограничивается на уровне $I_M \leq 20$ мА амплитуда импульсов тока, протекающего через обмотку вихретокового преобразователя, включенного в $L_1 C_1$ -контур (рис. 1, а);

- резистор R_2 , установленный в цепи питания, уменьшает мощность рассеяния микросхемы D1, и совместно с конденсатором C_2 выполняет функцию низкочастотного фильтра. Практически номинал резистора R_2 выбирается таким образом, чтобы падение напряжения на нем не превышало порогового напряжения открывания МОП транзисторов микросхемы D1 по условию: $\Delta U_{R_2} \leq U_{ПОР} \approx 0,8$ В.

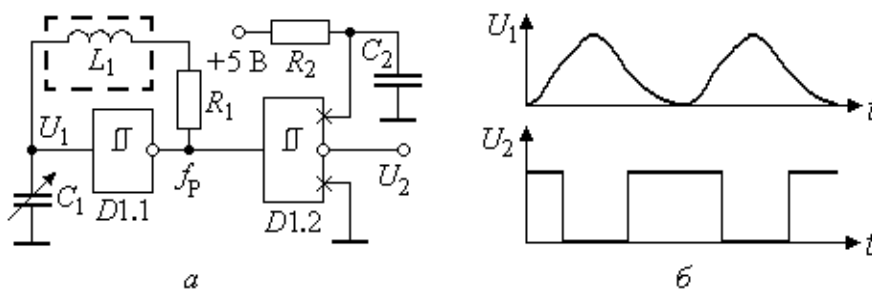


Рисунок 1 – Схема (а) и осциллограммы работы генераторного преобразователя (б)

Данное положение объясняется тем, что ограниченная скорость изменения сигналов на входе элемента D1.1 в генераторе на быстродействующих КМОП микросхемах серии КР1554 приводит к значительному возрастанию сквозного тока, протекающего через этот элемент в моменты переключения. В итоге при непрерывной работе высокочастотного генератора происходит дополнительный нагрев КМОП микросхемы, приводящий к смещению пороговых напряжений срабатывания и вариации входной емкости логического элемента D1.1, влияющих на резонансную частоту f_p . Уменьшение тока по цепи питания микросхемы в общем случае приводит к некоторому понижению амплитуды выходных импульсов по сравнению с номинальным напряжением питания. Однако небольшое

снижение амплитуды импульсов ($\Delta U_{R2} \leq 0,8$ В) не влияет на работу КМОП микросхем, подключаемых к выходу генератора [3].

Применение токоограничивающих резисторов R_1 и R_2 позволило снизить мощность рассеяния микросхемы $D1$ до уровня $P_{РАС} \leq 20$ мВт и тем самым уменьшить ее влияние на стабильность резонансной частоты f_p при использовании вихретокового преобразователя в непрерывном режиме контроля.

В результате экспериментальных исследований установлено, что частота резонансных колебаний в схеме генератора (рис. 1, а) при заданных параметрах ($L_1 = 30$ мкГн, $C_1 = 30$ пФ, $R_1 = 240$ Ом) должна теоретически составлять $f_p \approx 5,3$ МГц. Однако ее реальное значение, измеренное цифровым частотомером, составляет $f_p \approx 4,49$ МГц и отличается на 15% от расчетного значения. Полученный результат является вполне корректным, так как на частоту колебаний оказывают влияние входная емкость $C_{ВХ} \approx 3$ пФ и ограниченная скорость нарастания выходного напряжения логического элемента $D1.1$.

При использовании вихретоковых генераторных преобразователей для допускового контроля толщины покрытия малогабаритных деталей практически невозможно по технологическим причинам получить большой коэффициент заполнения, так как размеры изделий значительно меньше зазора между датчиком и контролируемой поверхностью покрытия. При малом коэффициенте заполнения ($K_{ЗП} \leq 0,1$) вихретокового преобразователя изменение резонансной частоты последовательного L_1C_1 -контура для деталей с микронной толщиной покрытия не превышает значений $\Delta f_p \approx (0,1 \dots 9,0)$ кГц при установке начальной резонансной частоты в диапазоне $f_p \approx (1 \dots 25)$ МГц.

При экспериментальном исследовании схемы генератора с вихретоковым преобразователем в цепи обратной связи (рис. 1, а) установлено, что исключение токоограничивающего резистора R_1 приводит к снижению частотной чувствительности датчика к относительному изменению Δh толщины h контролируемого немагнитного покрытия до значений порядка $S_f = \Delta f_p / \Delta h \approx (0,2 \dots 3,5)$ кГц/мкм.

В частности, изменение толщины покрытия выводов транзисторов на $\Delta h = 4$ мкм приводит к девиации резонансной частоты на $\Delta f_p \approx 2,4$ кГц относительно начального значения $f_p \approx 7,2$ МГц (при исключении из схемы сопротивления R_1). При наличии резистора $R_1 = 240$ Ом начальная частота генератора возрастает до уровня $f_p \approx 11,2$ МГц, а ее девиация – до $\Delta f_p \approx 12$ кГц при аналогичном изменении толщины покрытия.

Согласно полученным результатам экспериментов, уменьшение сопротивления R_1 и, соответственно, повышение добротности L_1C_1 -контура приводит к снижению чувствительности и повышению резонансной частоты f_p колебаний. Это, на первый взгляд, противоречит теоретическим положениям по свойствам резонансных контуров, согласно которым увеличение сопротивления последовательного LC -контура должно приводить к понижению частоты f_p [1]. Однако данное противоречие связано с нелинейным процессом перезаряда реактивных элементов в схеме генератора с активными КМОП элементами. Известно [4], что для защиты от статического электричества на входах КМОП микросхем используются диодные ограничители напряжения с минимальным $U_{MIN} \approx -0,6$ В и максимальным $U_{MAX} \approx (U_{ПИТ} - 0,6)$ В уровнями ограничения входного сигнала. При высокой добротности L_1C_1 -контура размах амплитуды сигнала на входе логического элемента $D1.1$ значительно превышает напряжение питания ($2U_M > U_{ПИТ}$), поэтому разряд реактивных LC -элементов в течение части периода колебаний происходит через ограничительные диоды. Данное обстоятельство является причиной уменьшения чувствительности датчика к толщине контролируемого покрытия. Кроме того, открывание ограничительных диодов в цифровой микросхеме при большой амплитуде сигнала на входе элемента $D1.1$ приводит к шунтированию L_1C_1 -контура. Такое шунтирование, в свою очередь, понижает эквивалентную добротность контура и, как следствие, приводит к уменьшению его резонансной частоты f_p при малом сопротивлении R_1 .

В большинстве существующих и серийно выпускаемых приборов контроля толщины покрытия, основанных на вихретоковом методе преобразования, используют, как правило,

высокочастотные генераторы возбуждающего сигнала, реализованные на транзисторах или на операционных усилителях. Однако полученные результаты проведенных исследований, при которых экспериментально опробовано несколько схем высокочастотных генераторов на различных цифровых КМОП микросхемах, позволяют сделать вывод о перспективности их применения в приборах неразрушающего контроля, так как такие генераторы отличаются пониженной мощностью, потребляемой от источника питания, и обеспечивают высокий КПД.

В процессе исследований установлено, что наибольшая стабильность частоты колебаний при наименьшей мощности потребления обеспечивается в генераторах, реализованных на логических микросхемах только двух типов – КР1554ТЛ1 («Триггер Шмитта») и КР1554ЛП5 («Исключающее ИЛИ») [2]. Однако в генераторах на элементах типа КР1554ТЛ1 частота колебаний зависит от изменения температуры окружающей среды, что обусловлено изменением порогов срабатывания триггера Шмитта при нагревании микросхемы. Поэтому в реальном приборе контроля толщины немагнитных покрытий применен генератор высокочастотных импульсов на логических элементах «Исключающее ИЛИ» типа КР1554ЛП5 (рис. 2).

В этом генераторе первый логический элемент D1.1 охвачен цепью положительной обратной связи через резисторы R_3 , R_4 и выполняет функцию триггера Шмитта. В данном триггере Шмитта обеспечивается высокая стабильность зоны гистерезиса $\Delta U_{\Gamma} = U_{\text{пит}} \cdot 2R_3 / R_4 \approx 1$ В, которая зависит только от отношения сопротивлений R_3 , R_4 и напряжения источника питания $U_{\text{пит}} = 5$ В. Поэтому температурные изменения уровня срабатывания микросхемы КР1554ЛП5 не влияют на частоту выходных импульсов генератора.

По аналогии с первой схемой, в этом генераторе резистором R_1 ограничивается амплитуда импульсов тока, протекающего через обмотку вихретокового датчика с индуктивностью L_1 , а резистором R_2 понижается ток питания и рассеиваемая мощность микросхемы. При этом за счет избирательных свойств последовательного L_1C_1 -контура формируется возбуждающий ток практически синусоидальной формы.

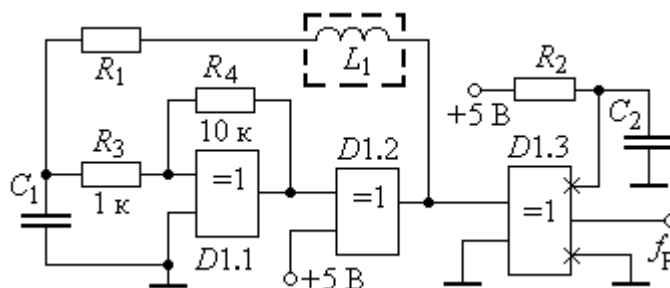


Рисунок 2 – Практическая схема высокочастотного генератора импульсов

Для повышения частотной чувствительности к толщине контролируемого покрытия в приборе для контроля толщины немагнитных покрытий использован принцип преобразования частоты. При этом кроме основного генератора возбуждающего сигнала на микросхеме D1 дополнительно применен образцовый генератор импульсов с кварцевой стабилизацией частоты, собранный на элементах микросхемы D2 с кварцевым резонатором BQ и конденсатором C_3 в цепи положительной обратной связи (рис. 3).

Для исключения эффекта взаимного захвата резонансной f_p и образцовой f_0 частот в цепях питания цифровых микросхем D1 и D2 типа КР1554ЛП5 установлены RC-фильтры. При этом резисторами R_2 и R_6 ограничиваются токи питания микросхем D1 и D2 для повышения стабильности частоты импульсов.

Триггер D3 в схеме генераторного преобразователя (рис. 3) применен для выделения разностной частоты колебаний $\Delta f_p = |f_0 - f_p|$ и позволяет при близких значениях частот $f_0 \approx f_p$ значительно повысить относительную чувствительность датчика $S_f = (\Delta f_p / |f_0 - f_p|) / (\Delta L_1$

$/L_1$) к относительному изменению эквивалентной индуктивности $\Delta L_1/L_1$ вихретокового преобразователя при контроле толщины покрытий [4].

При подаче двух импульсных последовательностей разной частоты на C - и D -входы D -триггера на его выходе формируются импульсы, частота которых определяется модулем разности частот этих сигналов: $f_{\text{вых}} = |f_0 - f_p|$. Однако такая зависимость выполняется при отношении частот $f_0 / f_p < 0,5$. При большой разности двух частот вместо D -триггера можно использовать реверсивный счетчик импульсов, работающий в режиме суммирования и вычитания числа входных импульсов.

При использовании дифференциального генераторного устройства в приборах неразрушающего контроля необходимо учитывать, что увеличение толщины немагнитного покрытия Δh приводит к понижению резонансной частоты f_p , поэтому для получения результатов измерений, пропорциональных Δh , нужно частоту образцового генератора устанавливать заведомо больше рабочей частоты по условию: $f_0 \geq f_p$.

С учетом этого в приборе контроля кварцевый генератор образцовой частоты $f_0 = 8$ МГц, а начальная частота резонанса устанавливалась переменным конденсатором C_1 на уровне $f_p \approx (7,8 \dots 7,9)$ МГц.

Установка близких значений образцовой f_0 и рабочей f_p частот при выполнении такого условия позволяет повысить коэффициент модуляции частоты выходных импульсов при изменении толщины покрытия.

Например, при исходном значении резонансной частоты $f_p = 7,8$ МГц в предыдущей схеме (рис. 2), увеличение индуктивности преобразователя на $\Delta L_1/L_1 = 1\%$ приводит к уменьшению резонансной частоты L_1C_1 -контура на $\Delta f_p \approx 38,2$ кГц, а относительная чувствительность такого преобразователя составляет всего

$$S_f = (\Delta f_p / f_p) / (\Delta L_1 / L_1) \approx (38,2 \cdot 100 / 7800) / (1,0) \approx 0,49$$

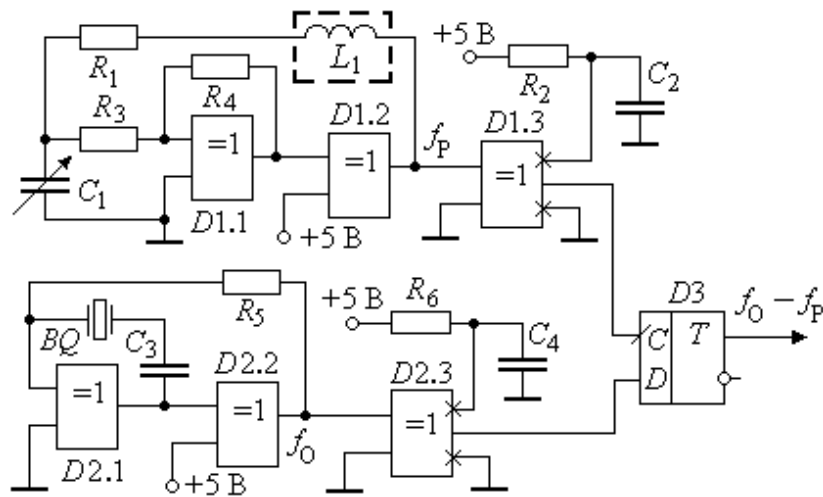


Рисунок 3 – Схема дифференциального блока контроля с образцовым и рабочим генераторами

В то же время применение D -триггера $D3$, выполняющего операцию вычитания двух близких частот, – резонансной $f_p = 7,8$ МГц и образцовой частоты $f_0 = 8$ МГц, в дифференциальной схеме прибора (рис. 3), позволяет повысить относительную чувствительность генераторного преобразователя примерно в 39 раз:

$$S_f = (\Delta f_p / |f_0 - f_p|) / (\Delta L_1 / L_1) \approx (38,2 \cdot 100 / 200) / (1,0) \approx 19,1.$$

Необходимо отметить, что при близких значениях частот $f_0 \approx f_p$ значительно возрастают требования к обеспечению высокой стабильности начального значения

резонансной частоты ($f_{р.нач} = \text{const}$), которая особенно важна при допусковом контроле толщины немагнитных покрытий вихретоковым методом.

Дифференциальный генераторный блок использован для экспериментальных исследований характеристик различных вихретоковых датчиков контроля толщины покрытия. Для проведения исследований были отобраны образцы выводов различных полупроводниковых приборов (светодиодов, мощных транзисторов и тиристоров) сначала без защитного покрытия, а потом и с защитным покрытием двух типов (никелированные и посеребренные контакты). Для набора статистики использованы 20 светодиодов, 10 мощных транзисторов и 10 тиристоров, имеющих по три вывода длиной 3 см. Номинальная толщина немагнитного покрытия на образцах составляла $h_э = (6 \pm 0,3)$ мкм. Предварительно толщина покрытия была измерена оптическим методом (нанесением рисок и измерением значений $h_э$ под микроскопом).

В результате проведенных исследований установлено, что при любой конструкции датчиков (в форме прямоугольного соленоида или датчика щелевого типа) наблюдается наличие краевых эффектов – при отклонении контролируемой детали от центра датчика индуктивность вихретокового преобразователя изменяется по экспоненциальному закону (рис. 4). Уменьшение габаритных размеров вихретоковых датчиков сужает плоский участок на характеристике преобразования $\Delta f_p = F(h)$, а увеличение этих размеров приводит к понижению чувствительности при контроле толщины покрытия миниатюрных деталей.

Согласно полученным графикам (рис. 4), влияние краевого эффекта увеличивается пропорционально частоте f_p резонанса L_1C_1 -контура. Экспериментально установлено, что данный эффект обусловлен влиянием паразитной емкости между витками обмотки и контролируемой деталью. Вносимая емкость зависит от габаритных размеров и от формы изделия, поэтому практически трудно учесть ее влияние. Вследствие этого целесообразно ограничивать максимальную частоту возбуждающего сигнала на уровне $f_{в.макс} \leq 10$ МГц.

Для ослабления влияния краевого эффекта в конструкции вихретоковых преобразователей были добавлены пластмассовые вставки (кассеты), чтобы центрировать полупроводниковые малогабаритные изделия в датчике при контроле толщины покрытия. Практическое применение таких кассет позволяет уменьшить габаритные размеры вихретоковых датчиков и повысить их чувствительность при контроле толщины покрытия в частотном диапазоне $f_p \approx (5 \dots 10)$ МГц.

Кроме оценки краевого эффекта экспериментально исследована зависимость отклонения резонансной частоты Δf_p от количества n контролируемых выводов полупроводниковых элементов (рис. 5). Установлено, что повышение частоты f_p резонанса L_1C_1 -контура позволяет ослабить влияние основы контролируемых изделий на результаты измерения толщины немагнитного покрытия, однако при этом понижается чувствительность вихретокового датчика, особенно при увеличении количества выводов контролируемых элементов.

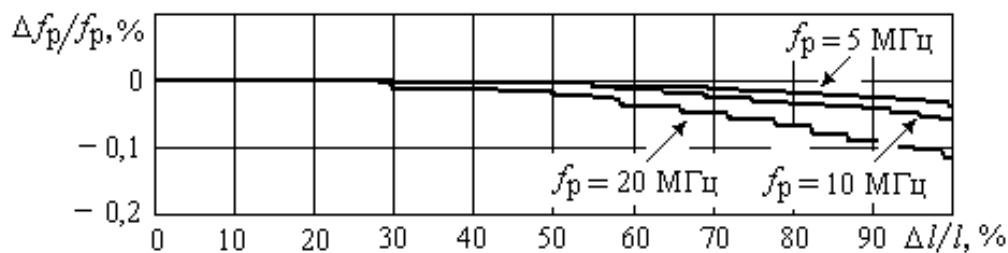


Рисунок 4 – Зависимость отклонения частоты Δf_p при смещении Δl детали от центра датчика

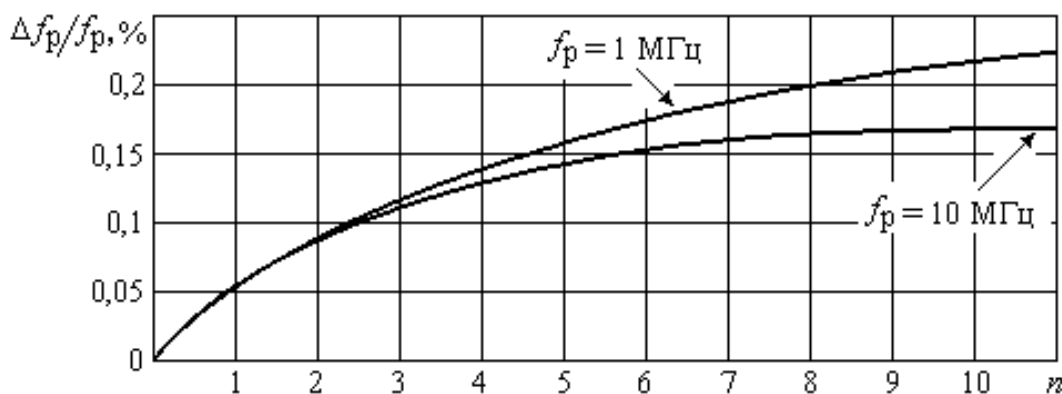


Рисунок 5 – Зависимость отклонения частоты Δf_p от количества n выводов элементов

Результаты экспериментальных исследований характеристик генераторов на цифровых микросхемах практически использованы при разработке малогабаритного прибора допускового контроля.

Конструктивно высокочастотная часть прибора допускового контроля выполнена в виде отдельного блока с автономным питанием $U_{пит} = 5$ В, который подключается к мультиметру типа DT-830B (рис. 6).

В высокочастотном блоке прибора кроме вычитания образцовой f_0 и резонансной f_p выполняется преобразование разностной частоты Δf_p в постоянное выходное напряжение U_Φ для его последующего измерения цифровым мультиметром. При этом делитель частоты (ДЧ) формирует низкочастотные импульсы, длительность которых зависит от коэффициента деления $K_{дч}$ образцовой частоты f_0 и определяется выражением $T_{и} = K_{дч} / f_0$. Триггеры D4, D5 с элементом «Исключающее ИЛИ» D6 выполняют функцию удвоения частоты, т. е. импульсы стабильной длительности $T_{и}$ появляются на выходе элемента D6 по срезу и по фронту импульсов разностной частоты $\Delta f_p = f_0 - f_p$, т. е. два раза в каждом ее периоде.

После усреднения выходных импульсов элемента «Исключающее ИЛИ» D6 низкочастотным $R_\Phi C_\Phi$ -фильтром на его выходе получается напряжение, зависящее от частоты: $U_\Phi = 2U_{пит}T_{и}\Delta f_p = 2U_{пит}\Delta f_p K_{дч} / f_0$.

Делитель напряжения R_1, R_2 применен для компенсации начальной разностной частоты $\Delta f_{р.нач}$, поэтому показания мультиметра пропорциональны ее отклонению Δf_p , зависящему от толщины покрытия.

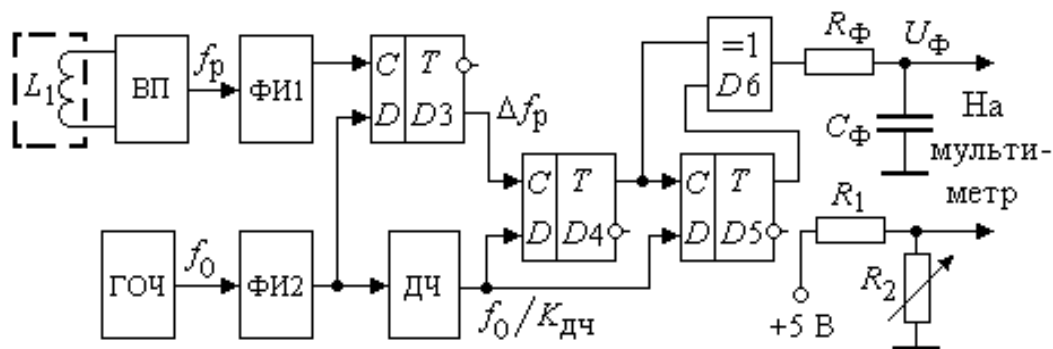


Рисунок 6 – Функциональная схема автономного прибора контроля толщины покрытий

В приборе используется генератор образцовой частоты $f_0 = 8$ МГц с цифровым делителем на микросхеме типа КР1554ИЕ10, которая обеспечивает коэффициент деления частоты $K_{дч} = 8$. При установке начального значения разностной частоты $\Delta f_p = f_0 - f_p = 200$

кГц, соответствующего нулевой толщине контролируемого покрытия, исходное напряжение на выходе $R_{\Phi}C_{\Phi}$ -фильтра составляет $U_{\Phi,НАЧ} = 2$ В.

Практически установлено, что во всем диапазоне контроля толщины покрытия относительное изменение индуктивности вихретокового преобразователя не превышает $\Delta L_1/L_1 \leq \pm 0,5\%$, поэтому выходное напряжение прибора изменяется максимально на величину $\Delta U_{\Phi} \approx \pm 190$ мВ. Это позволяет, во-первых, регулировкой потенциометра R_2 установить напряжение на выходе резистивного делителя равным начальному напряжению $U_{R2} \approx U_{\Phi,НАЧ} = 2$ В, а во-вторых, использовать мультиметр DT-830В на младшем пределе измерения $U_{\text{ИР}} = 200$ мВ, обеспечивая его высокую чувствительность ($\Delta U = 10$ мкВ). Применение мультиметра DT-830В с двухтактным интегрирующим преобразованием для контроля толщины покрытия позволяет ослабить влияние помехи сетевой частоты 50 Гц на стабильность результатов измерений.

Автономный прибор контроля с мультиметром DT-830 применялся для исследования зависимости разностной частоты Δf_p от толщины никелированного (Ni), серебряного (Ag) и золотого (Au) покрытий выводов светодиодов, полевых транзисторов и тиристоров, выпускаемых предприятием «Протон». Измерения проводились при установке начальной частоты $f_p = 7,8$ МГц. После статистической обработки результатов получены функции преобразования прибора, показанные на рис. 7.

Особенность допускового контроля толщины покрытия заключается в сравнении измеряемых значений толщины h с допустимыми границами, составляющими 5,5 и 6,5 мкм. При использовании автономного прибора с нелинейными характеристиками преобразования (рис. 7) необходимо заранее знать материал покрытия, чтобы сравнивать показания мультиметра (в милливольтках) с заданными для данного материала допустимыми пределами. В частности, при контроле никелированного покрытия тиристорных выводов показания мультиметра DT-830 изменяются в пределах от $U_{\text{МИН}} = 29$ мВ до $U_{\text{МАХ}} = 34$ мВ. При аналогичной толщине серебряного покрытия – в пределах от $U_{\text{МИН}} = 54$ мВ до $U_{\text{МАХ}} = 59$ мВ, и т. п.

Для большинства контролируемых покрытий на клеммах и выводах полупроводниковых изделий допустимый диапазон изменения напряжения мультиметра не превышает значений $\Delta U_{\Phi} \approx (5...7)$ мВ. С учетом этого при выборочном контроле толщины покрытия полупроводниковых изделий разного типа использовался метод замещения. Сначала в вихретоковый датчик устанавливалась деталь с эталонной толщиной покрытия $h_{\text{Э}}$, и фиксировалось показание мультиметра $U_{\text{Э}}$.

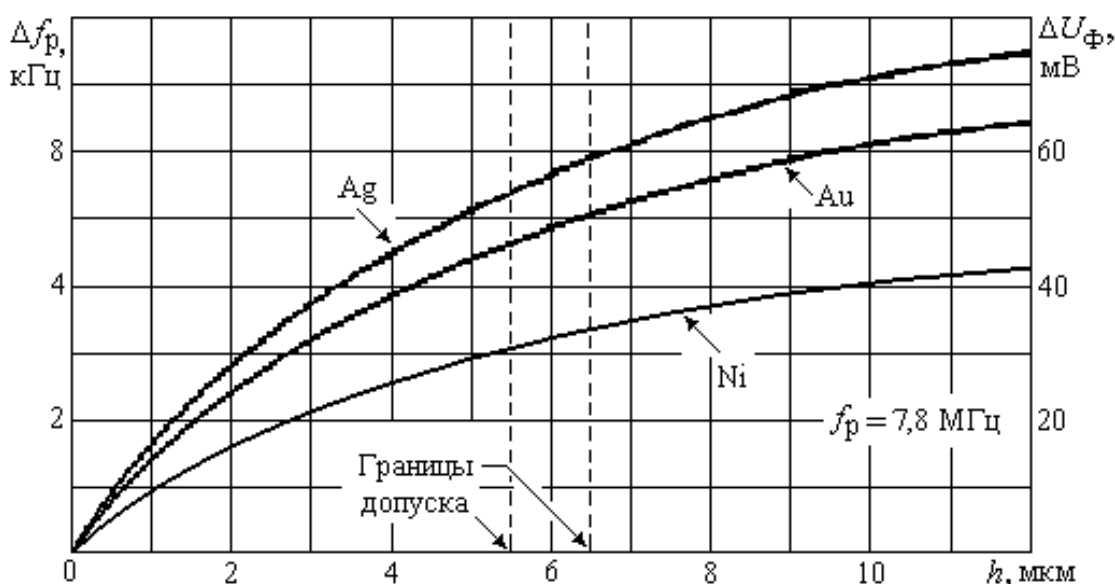


Рисунок 7 – Зависимость отклонения частоты от толщины покрытия h

Затем в этом же датчике размещалось контролируемое изделие, и после измерения напряжения $U_{РАБ}$ выполнялось вычитание полученных напряжений и их сравнение с допустимым диапазоном по простому условию $U_{Э} - U_{РАБ} \leq \pm 3$ мВ.

В практическом плане применение сравнительно простого и портативного цифрового устройства контроля с автономным питанием позволяет измерять толщину покрытия и оценивать качество изделий на разных этапах технологического процесса без существенных материальных и временных затрат. При этом нелинейность характеристики преобразования сравнительно мало влияет на достоверность результатов допускового контроля вследствие узкого диапазона измерения (вблизи одной рабочей точки).

Нелинейная зависимость между изменением частоты генераторного датчика и контролируемой толщиной немагнитного покрытия наблюдается для различных вихретоковых преобразователей. Поэтому в широкодиапазонных приборах целесообразно использовать микропроцессор, позволяющий реализовать автоматическую коррекцию погрешностей непосредственно в процессе обработки полученных данных.

Основную трудность при разработке приборов контроля представляет конструирование вихретоковых преобразователей, которые должны иметь высокую чувствительность к толщине покрытия и ослаблять влияние электромагнитных помех. В частности, если амплитуда высокочастотного напряжения на обмотке вихретокового датчика составляет $U_M \approx 2,5$ В, и при его резонансном сопротивлении $\rho \approx 1$ кОм мощность высокочастотного сигнала сравнительно невелика: $P_{ВЧ} = U_M^2 / 2\rho \approx 3,1$ мВ. Вследствие этого требуется применять электромагнитное экранирование вихретокового преобразователя и всего высокочастотного блока, чтобы исключить влияние наводок на достоверность результатов контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]/ С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1983. – 536 с.
2. Петровский, И. И. Логические интегральные схемы КР1533, КР1554 [Текст]: справочник. Часть 2/ И.И. Петровский, А.В. Прибыльский, А.А. Троян, В.С. Чувелев. – М.: ТОО «Бином», 1993. – 496 с.
3. Загорский, Я. Т., Иванов Б. Р. Микромощные электронные измерительные устройства [Текст]/ Я.Т. Загорский, Б.Р. Иванов. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
4. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах [Текст]/ В.С. Гутников. – М.: Энергия, 1984. – 306 с.

Н.Г. Богданов

Академия ФСО России, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
Тел.(0862) 419947

С.Н. Щекотихин

Академия ФСО России, г. Орел

УДК 681.122.2

М.В. ЛУНИН

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЗЫРЬКОВОГО РАСХОДОМЕРА

Статья включает математическое описание процессов, влияющих на объем пузырька с газом с регистрацией параметров вязкой среды. Также, статья включает обзор современных методов и средств измерения малых расходов газа.

The article contents mathematical description of processes which influencing on volume of gas-bubble with registration parameters of viscous liquid. In addition, article includes review of modern methods and tools measurement small-scale consumption of gas.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАСХОДОВ ГАЗА, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимость измерения малых и микрорасходов газа возникает при контроле и управлении технологическими процессами на предприятиях пищевой промышленности, при контроле расхода газа высокой температуры в металлургических реакторах, требующем высокой точности, а также при проведении научно-исследовательских работ. Нижняя граница малых расходов определяется требованиями практики: например, $1 \text{ см}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ для жидкостей и $50 \text{ см}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ для газов [1]. Таким образом, актуальными являются исследования и разработки, направленные на расширение возможностей и повышение точности методов и средств контроля малых и микрорасходов газа.

Известны расходомеры для измерения расхода газа, основанные на различных принципах. Для измерения малых объемов газа используются методы: тепловых меток, переменного перепада давления, ультразвуковой, обтекания, турбинный (тахометрические расходомеры), вихревой, кориолисовый силовой и капельно-пузырьковый. Технические характеристики средств измерения расхода, приведены в таблице 1. [1,2,3]

Таблица 1 - Технические характеристики средств измерения расхода

Название метода измерения	Наименьший расход, $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$, $\text{г} \cdot \text{ч}^{-1}$	Погрешность средства измерения, %	Марка прибора
Переменного перепада давления	10 - 200 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	1,5	СГКИ-4
Обтекания	10 - 50 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	1-3	DK-32 PM-1
Вихревой	5000 - 10000 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	1	ВРСГ-1
Турбинный	50 - 150 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	1	РСГ-1
Тепловой	1 - 10 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	1-5	ИРГ, FCI FR, FlexMasster
Кориолисовый силовой	100 - 200 $\text{г} \cdot \text{ч}^{-1}$	0,5	CORI-Flow
Ультразвуковой	20 - 50 $\text{мл} \cdot \text{с}^{-1}$	2-5	ГАЗ 001

В случае если речь идет о необходимости контроля расхода малых и микрообъемов, наиболее точными являются пузырьковые и капельные расходомеры. В частности, в источнике [4] описывается дискретный метод измерения малых объемов газа. При реализации метода осуществляется барботаж измеряемого газа через слой жидкости с одновременным подсчетом числа пузырьков газа.

В подобных дискретных устройствах отсутствует учет целого ряда параметров среды, используемой для барботажа. Такие недостатки свойственны пузырьковым расходомерам. Например, в [1] рекомендуется при реализации метода применять жидкости с высокой температурой кипения. Там же указывается, что при правильном выборе поверхностно-активного вещества погрешность измерения расхода не будет превышать 0,7 %. Подобные рекомендации приводят к увеличению времени проведения измерения и ограничивают области применения таких методов и устройств.

Кроме того, принято считать, что объем пузырька остается постоянным и определяется в первую очередь величиной диаметра сопла. Однако, в [1] утверждается, что в капельных и пузырьковых расходомерах изменение температуры сказывается на объеме пузырька с газом и массе капли. Так, изменение температуры воды на 15 °С вызывает изменение объема и массы на 2 %. Кроме того, при реализации метода система находится в таком режиме, что каждый пузырек газа образуется в отдельности, отрывается и поднимается независимо от других, не образуя струю. Это накладывает ограничения при проведении измерения, связанные с необходимостью термостатирования, и также снижает возможности метода и средства измерения.

В настоящей работе изложены результаты моделирования процесса перемещения пузырьков газа в пространстве между двумя фиксированными уровнями вязкой среды.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБЪЕМ ПУЗЫРЬКА ГАЗА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ВЯЗКОЙ СРЕДЫ

При моделировании были сделаны следующие допущения: форма пузырька – сферическая, не учитывается изменение объема пузырька при подъеме с глубины, отсутствует диффузия между жидкостью и газом, пузырек движется вертикально и равноускоренно.

Известно, что с увеличением температуры уменьшается величина коэффициента поверхностного натяжения и динамическая вязкость среды. Изменение параметров вязкой среды будут приводить к изменению объема пузырьков с газом. Необходимо учитывать комплекс этих параметров. Следовательно, необходимо выявить взаимосвязь между объемом пузырька с газом, температурой, коэффициентом поверхностного натяжения и динамической вязкостью.

С этой целью проведем моделирование, которое обычно проводится при получении формулы Пуазейля. [5] Для этого выделим цилиндрический объем вязкой среды некоторого радиуса r и длиной l (рис. 1).

Пузырек газа может находиться на торцах цилиндра, на которых поддерживается давление p_1 и p_2 , что обуславливает действие сил давления, сумма которых равна:

$$F = S_1(p_1 - p_2),$$

где: $S_1 = \pi \cdot r^2$ - площадь основания цилиндра.

Тогда:

$$F = \pi \cdot r^2 \cdot (p_1 - p_2). \tag{1}$$

На поверхность пузырька со стороны окружающего слоя вязкой среды действует сила внутреннего трения – сила Ньютона [1]:

$$F = \eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot S_2 = \eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l, \quad (2)$$

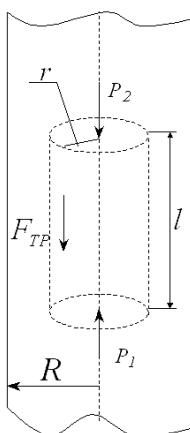


Рисунок 1 – Цилиндрический объем вязкой среды

где: η - динамическая вязкость; $\frac{dv}{dr}$ - показывает, как быстро меняется скорость от слоя к слою в направлении r ; $S_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ - площадь внешней поверхности цилиндра.

Следует заметить, что движение пузырька будет сложным: сначала, когда скорость мала, оно будет близким к равноускоренному. Скорость растет в начале движения примерно пропорционально времени. Далее ускорение будет постепенно уменьшаться из-за увеличения противодействующей силы трения вязкой среды. Это приведет к тому, что пузырек начнет двигаться равномерно.

Сила Архимеда, действующая на пузырек, имеет вид:

$$F_{АРХ} = m_{жс} \cdot g = \rho_{жс} \cdot V_{ГАЗА} \cdot g. \quad (3)$$

Силу тяжести запишем следующим образом:

$$P = m_{ГАЗА} \cdot g = \rho_{ГАЗА} \cdot V_{ГАЗА} \cdot g. \quad (4)$$

Учитывая (3) и (4), запишем соотношение:

$$\frac{F_A}{P} = \frac{\rho_{жс} \cdot V_{ГАЗА} \cdot g}{\rho_{ГАЗА} \cdot V_{ГАЗА} \cdot g} = \frac{\rho_{жс}}{\rho_{ГАЗА}}. \quad (5)$$

Из соотношения (5), видно, что $\rho_{жс} \gg \rho_{ГАЗА}$, тогда действующей на пузырек силой тяжести можно пренебречь.

При равномерном движении в вязкой среде выталкивающая сила должна уравниваться силой Ньютона, т.е. имеет место равенство:

$$\pi \cdot r^2 (p_1 - p_2) = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l. \quad (6)$$

Знак минус в уравнении (6) означает, что $\frac{dv}{dr} < 0$, т.е. скорость уменьшается с увеличением расстояния от оси трубы.

Дифференциальное уравнение (6) запишем в виде:

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{r \cdot (p_1 - p_2)}{\eta \cdot 2 \cdot l}, \quad (7)$$

В результате интегрирования уравнения (7), получим:

$$v = -\frac{(p_1 - p_2) \cdot r^2}{4 \cdot \eta \cdot l} + C. \quad (8)$$

Постоянную интегрирования выберем так, чтобы скорость обращалась в нуль на стенках цилиндра, т.е. при $r = R$. Учитывая это условие:

$$C = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l}. \quad (9)$$

Подставим (9) в (8), получим:

$$v(r) = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (10)$$

На рис. 2 приведена зависимость изменения скорости при ламинарном течении от расстояния от оси цилиндра.

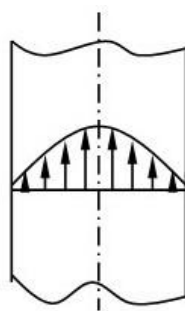


Рисунок 2 – Зависимость изменения скорости при ламинарном течении

Значение скорости на оси цилиндра при $r \rightarrow 0$ равно:

$$v_{\max} = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l}. \quad (11)$$

Скорость определим по формуле:

$$v = \frac{l}{t}. \quad (12)$$

Подставим (12) в (11), получим:

$$\frac{l}{t} = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2}{4 \cdot \eta \cdot l}.$$

Отсюда, вязкость определим как:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R^2 \cdot t}{4 \cdot l^2}, \quad (13)$$

где: t – время прохождения отрезка l .

Величины давлений p_1 и p_2 определим по формуле:

$$p_x = \rho_{\text{жидк}} \cdot g \cdot h_x, \quad (14)$$

где: $\rho_{\text{жидк}}$ – плотность вязкой среды; g – ускорение свободного падения; h_x – высота столба вязкой среды.

Зная зависимость вязкости от температуры для данной жидкости, оценив вязкость жидкости в данных условиях можно получить температуру жидкости Θ в данных условиях.

Коэффициент поверхностного натяжения можно представить выражением [5]:

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad (15)$$

где $l = 2 \cdot \pi \cdot r$ – длина контура сечения через половину сферы.

Разделив левую и правую часть уравнения (6) на $2 \cdot \pi \cdot r$, получим:

$$\frac{\pi \cdot r^2 (p_1 - p_2)}{2 \cdot \pi \cdot r} = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot l. \quad (16)$$

Учитывая (15), перепишем (16):

$$\frac{F}{l} = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot l.$$

Из уравнения (16) видно, что:

$$\frac{\pi \cdot r^2 (p_1 - p_2)}{2 \cdot \pi \cdot r} = \sigma.$$

Уравнение (16), можно записать следующим образом:

$$\sigma \cdot dr = -\eta \cdot dv \cdot l. \quad (17)$$

В результате интегрирования (17), получим:

$$v = -\frac{\sigma}{\eta \cdot l} \cdot r + C. \quad (18)$$

Постоянную интегрирования выберем так, чтобы $v = 0$ при $r = R$. Учитывая это условие:

$$v = \frac{\sigma}{\eta \cdot l} \cdot R \cdot \left(1 + \frac{r}{R}\right). \quad (19)$$

Значение скорости на оси цилиндра, при $r \rightarrow 0$ равно:

$$v_{\max} = \frac{\sigma}{\eta \cdot l} \cdot R. \quad (20)$$

Перепишем (20):

$$\sigma = \frac{\eta \cdot l \cdot v_{\max}}{R} = \frac{\eta \cdot l^2}{R \cdot t}. \quad (21)$$

Выражение (21) используется для получения коэффициента поверхностного натяжения. Так же информацию о коэффициенте поверхностного натяжения можно получить из градуировочных характеристик для данной жидкости.

Если газ в пузырьке имеет температуру отличную от температуры вязкой жидкости, то имеет место теплообмен между газом и жидкостью. Вязкость от температуры определяется экспоненциальной зависимостью:

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp\left[\frac{E}{\bar{R} \cdot \Theta}\right], \quad (22)$$

где: η_0 - множитель, не зависящий от температуры; \bar{R} - постоянная Больцмана; E - энергия активации вязкого течения.

Следует заметить, что если газ в пузырьке имеет температуру, значительно отличающуюся от температуры вязкой жидкости, то каждое прохождение горячего пузырька через слой вязкой среды будет её нагревать. При этом пузырек будет отдавать тепло и остывать, что в свою очередь будет приводить к изменению его объема. Моделирование теплообмена в двухфазной системе в данной работе не проводилось.

Определим окончательную зависимость для объема газа. Известен метод определения коэффициента поверхностного натяжения по методу отрыва пузырька внутри жидкости [6]. Давление внутри полусферического пузырька в момент отрыва от сопла максимально и превышает атмосферное на величину:

$$P_{ГАЗА} = g \cdot \rho_{жидк} \cdot D + \frac{2 \cdot \sigma}{R_s}, \quad (23)$$

где: R_s – радиус отверстия сопла; $\rho_{жидк}$ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения, D – глубина, на которой залегает вершина сопла от поверхности.

В этом состоянии пузырь делается неустойчивым, так как небольшое увеличение его радиуса уже уменьшает внутреннее давление, необходимое для равновесия. Поэтому если давление P увеличивается, равновесия далее не может быть, и пузырек отделяется от трубки.

Давление газа определим следующим образом:

$$P_{ГАЗА} = g \cdot \rho_{ГАЗА} \cdot \frac{V_{ГАЗА}}{\pi \cdot R_s^2}, \quad (24)$$

где: $\rho_{ГАЗА}$ – плотность газа (значение плотности газа выбирают в зависимости от температуры – Θ , которую определяют по градировочным характеристикам, для данной среды); $V_{ГАЗА}$ – объем газа в пузыре.

Из (23) и (24) определим объем газа в пузыре:

$$g \cdot \rho_{ГАЗА} \cdot \frac{V_{ГАЗА}}{\pi \cdot R_s^2} = g \cdot \rho_{жидк} \cdot D + \frac{2 \cdot \sigma}{R_s},$$

отсюда:

$$V_{ГАЗА} = \frac{\pi \cdot R_s}{g \cdot \rho_{ГАЗА}} (g \cdot \rho_{жидк} \cdot D \cdot R_s + 2 \cdot \sigma). \quad (25)$$

ВЫВОДЫ

При решении задачи повышения точности измерения и расширения возможностей пузырьковых расходомеров необходимо учитывать параметры вязкой среды, влияющие на результат измерения, – динамическая вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, температура.

По результатам моделирования получены зависимости, определяющие поведение пузырька газа при осуществлении барботажа через вязкую среду. Полученные зависимости можно использовать для дальнейшей разработки метода и средства измерения малых и микро расходов газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества [Текст] / П. П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. Пистун, Е. П. Определение расходных характеристик дроссельных элементов [Текст] / Е. П. Пистун, И. Д. Стасюк, З. Н. Теплюх // Авт. и КИП. - 1980. - № 4. - С. 28-32.
3. Гайнаков, Л. Э. Вихревой расходомер – счетчик газа. ВРСГ-1. Опыт создания и эксплуатации [Текст] / Л. Э. Гайнаков, З. Д. Гоголадзе, Д. В. Кратиров, С. М. Мелешкин, Н. И. Михеев, В. М. Молочников, А. А. Огарков, А. К. Сайкин, Х. А. Хайритонов // Законодательная и прикладная метрология. - 2001. - №1. – С. 32-38.
4. Бондарев, Г. С. Дискретный метод измерения малых объемов газа [Текст] / Г. С. Бондарев, В. С. Малышев // Измерител. техника. - 1970. - № 5. - С. 102-103.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики [Текст] / И. В. Савельев. - Т. 1. – М. - 1970. – 512 с.
6. Толстой, Н. А. Конспект лекций по молекулярной физике [Текст] / Н. А. Толстой. - Л.: М. -1990. -340с.

Лунин Максим Викторович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирант

Тел. (0862) 419876

E-mail: pms35@ostu.ru

Адрес редакции:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90, 40-96-14
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор Г.А. Константинова
Корректор Г.А. Константинова
Компьютерная верстка М.Н.Малахов

Сдано в набор 15.03.2008 г.
Подписано в печать 24.03.2008 г.
Формат 60x88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,4.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г.Орел, ул. Московская, 65.