

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц., секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редколлегия

Главный редактор

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

Заместители главного редактора

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф., член-кор. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Корндорф С.Ф. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск

Григорьева О.Ю.

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,
43-48-90

www.ostu.ru

E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе

по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2011

Содержание

Естественные науки

<i>Поландов Ю.Х., Барг М.А., Бабанков В.А.</i> О выгорании газо-воздушной смеси в закрытой емкости с перегородкой...	3
<i>Солдаткин В.В., Никитин А.В.</i> Комплексная система измерения малых воздушных скоростей вертолета с наблюдателем Люэнбергера.....	9
<i>Гозолев И.Г., Николаева Т.А., Дроконов А.М.</i> Исследование структуры потока в каналах направляющих аппаратов осевых турбинных ступеней средней верности.....	17
<i>Загрядский В.И., Кобяков Е.Т.</i> Гармонический анализ магнитного поля плоского витка с током в однородной изотропной среде.....	26
<i>Малинин В.В.</i> Структурно-аналитический критерий хрупкого разрушения для тел с макроконцентраторами напряжений.....	36

Моделирование технологических процессов

<i>Лобанов И.Е., Флейтлик Б.Б.</i> Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя.....	42
---	----

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Карелин О.О., Ремизов А.Е.</i> Экспериментальное исследование газодинамической эффективности и кинематических параметров переходных каналов различной степени расширения в условиях входной закрутки потока.....	51
<i>Старииков А.Н.</i> Оптимизация процессов испытаний кинематически силовых и энергетических параметров электрических двигателей серии ДМБ с целью выявления резервов функционирования.....	57
<i>Шишкарев М.П.</i> Исследование процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт.....	62

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Амбросимов С.К., Большаков А.Н.</i> Напряжённое состояние режущего клина при выходе его из зоны обработки... <i>Иванов В.В., Селеменов М.Ф., Марченко Ю.В.</i> Формирование вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена.....	66
<i>Морозов В.В., Шлегель А.Н., Аборкин А.В.</i> Эмпирические модели лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов стеклоформирующих машин.....	73
<i>Песин М.В., Мокроносов Е.Д.</i> К проблеме управления технологическими процессами в изготовлении деталей машиностроения.....	79
<i>Соловьев Д.Л., Киричек А.В., Медведев М.Н.</i> Возможности повышения долговечности траков гусеничных машин деформационным упрочнением.....	84
<i>Смоленцев Е.В., Григорьев С.Н.</i> Методология проектирования комбинированных методов обработки с наложением электрического поля.....	89
<i>Лазуткин Г.В., Лаврусь О.Е., Злобин С.Н., Кошелев А.В.</i> Исследование вынужденных установившихся колебаний виброзащитных систем с помощью гармонической и квазигармонической линеаризации упругогистерезисных характеристик виброизоляторов.....	93
<i>Гуцина Г.Д., Демидова Н.А., Некрасов Ю.Н.</i> Исследование процесса теплового воздействия на ткань для снятия остаточных деформаций.....	101
<i>Родичева М.В., Абрамов А.В., Борисова И.В.</i> Математическая модель оценки тепловых состояний человека при аттестации рабочих мест по условиям труда.....	107
<i>Тарпанов А.А., Глянец В.К.</i> Прогнозирование дизайна моделей и управление параметрами конструирования специализированной одежды.....	110
<i>Гуцина Г.Д., Демидова Н.А., Некрасов Ю.Н.</i> Исследование процесса теплового воздействия на ткань для снятия остаточных деформаций.....	116

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

<i>Гуцина Г.Д., Демидова Н.А., Некрасов Ю.Н.</i> Исследование процесса теплового воздействия на ткань для снятия остаточных деформаций.....	107
<i>Родичева М.В., Абрамов А.В., Борисова И.В.</i> Математическая модель оценки тепловых состояний человека при аттестации рабочих мест по условиям труда.....	110
<i>Тарпанов А.А., Глянец В.К.</i> Прогнозирование дизайна моделей и управление параметрами конструирования специализированной одежды.....	116

Инновации и кадры в машиностроении

<i>Бондарева С.Р.</i> Сценарный подход в формировании конкурентной стратегии машиностроительного предприятия.....	120
<i>Морозова А.В., Моськина Н.Е.</i> Специфика формирования системы дополнительного профессионального образования для специалистов машиностроительного производства в условиях профильного вуза.....	127

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Лисичкин В.Г.</i> Двухпараметровый прибор резонансного контроля влажности с пониженным энергопотреблением. <i>Зубарев А.С., Шкатов П.Н.</i> Выбор оптимальной схемы узла контроля газовых и водяных труб проходящих через межэтажные перекрытия в жилых зданиях и имеющие большой срок эксплуатации.....	134
<i>Зубарев А.С., Шкатов П.Н.</i> Выбор оптимальной схемы узла контроля газовых и водяных труб проходящих через межэтажные перекрытия в жилых зданиях и имеющие большой срок эксплуатации.....	141

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Подмастерьев К.В., Калашикова О.В.</i> Динамический метод оценки жесткости горизонтального шва двухслойных составных балок.....	147
<i>Кобзев И.О., Пахолкин Е.В.</i> О возможности исследования электрическим методом скорости термодеструкции смазочных материалов, определяемой максимальной температурой в зоне трения I.O.	152
<i>Мишин В.В., Молоцов Е.Н.</i> К вопросу возможности оценки действия РВС и модификаторов поверхностей трения по параметрам электрического сопротивления трибосопряжения.....	159
<i>Васильев А.М.</i> Оценка эффективности комплексного контроля качества в распределенных информационно-измерительных системах.....	167



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 2 (286) 2011
Mart – April

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution
«State University – Education-Scientific-Production Complex»
(State University – ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president
Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president
Borzenkov M.I. Candidate Sc.
Tech., Assistant Prof., secretary
Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.
Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.
Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.
Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

Editor-in-chief
Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.
Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech.,
Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof.
Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Corresponding Member of RAS
Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof.
Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof.
Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.
Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof.
Kolesnikov K.S. Doc. Sc. Tech.,
Prof., Academician of RAS
Korndorf S.F. Doc. Sc. Tech., Prof.
Malinin V.G. Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.
Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof.
Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof.,
Academician of RAS
Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof.
Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
Naugorskoye Chaussee, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-21
www.ostu.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration III № ФС77-35719 from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

©, 2011

Contents

Natural science

<i>Polandov Yu.Kh., Barg M.A., Babankov V.A.</i> About burning out of the gazo-air mix in the closed capacities with the partition.....	3
<i>Soldatkin V.V., Nikitin A.V.</i> Complex system for low helicopter airspeed measurement with the use of the luenberger observer.....	9
<i>Gogolev I.G., Nikolaeva T.A., Drokonov A.M.</i> The research of flow structure in the canal guide apparatus of the axial turbin middle-fan stage.....	17
<i>Zagryadtskiy V.I., Kobayakov E.T.</i> The harmonious analysis of the magnetic field of the flat coil with the current in the homogeneous isotropic environment.....	26
<i>Malinin V.V.</i> Structural and analytical criterion of the fragile destruction for matter with macroconcentrator tension.....	36

Process modeling

<i>Lobanov I.E., Fleytlich B.B.</i> Modelling of intensified heat exchange at turbulent current in flat channels with periodically superficially located vortex generator a stream on the basis of seven-layer model of a turbulent boundary layer.....	42
---	----

Construction, calculation, material

<i>Karelin O.O., Remizov A.E.</i> Experimental investigations of gas dynamic efficiency and kinematic characteristics of adapter channels with different widening under inflow twisting conditions.....	51
<i>Starikov A.N.</i> Test process optimization of kinematics, power and energy parameters in electric motors of dbm series for defenition of functioning reserves.....	57
<i>Shishkaryov M.P.</i> Research of adaptive friction clutch abrasion.....	62

Machine building technology and toolware

<i>Ambrosimov S.K., Bolshakov A.N.</i> Stress of wedge at its leaving a cutting area.....	66
<i>Ivanov V.V., Selemenev M.F., Marchenko Y.V.</i> Outlook for molybdenum disulfide application at formation of vibration chemimechanical solid lubrication coverings.....	73
<i>Morozov V.V., Shlegel A.N., Aborkin A.V.</i> Empirical models of laser hardening of working edges of parts of molds of glass-forming machines.....	79
<i>Pesin M.V., Mokrousov E.D.</i> To the problem of technological process control in machine element production.....	84
<i>Solov'ev D.L., Kirichek A.V., Medvedev M.N.</i> Opportunities of increase of durability tracks caterpillar machines deformation hardening.....	89
<i>Smolentsev E.V., Grigor'ev S.N.</i> The methodology of designing combined processing methods using electric field.....	93
<i>Lazutkin G.V., Lavrus O.E., Zlobin S.N., Koshelev A.V.</i> Research of compelled established fluctuations vibrodamping systems by means of harmonious and quasiharmonious linearization resilient hysteresis characteristics damper.....	101

Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Guschin G.D., Demidova N.A., Nekrasov Y.N.</i> Research of process of thermal action upon fabric for residual deformation elimination.....	107
<i>Rodicheva M.V., Abramov A.V., Borisova I.V.</i> Simulator for estimation of human thermal conditions at workplace certification by working conditions.....	110
<i>Tarapanov A.A., Glyantsev V.K.</i> Model design prediction and parameter control at designing special clothing....	116

Innovation and frame in machine building

<i>Bondareva S.R.</i> Scenario approach in competitive strategy at machine building company.....	120
<i>Morozova A.V., Mos'kina N.E.</i> Specifics of the formation of additional professional education for engineering production specialists in the profile high school.....	127

Instrument making and biotechnological system

<i>Lisichkin V.G.</i> Two-parametrical device of water content resonant control with the reduced power consumption....	134
<i>Zubarev A.S.</i> Choosing the optimal scheme of UT testing of gas and water pipes with long operation life and passing through hidden divisions in apartment houses and buildings.....	141

Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Podmasteryev K.V., Kalashnikova O.V.</i> The dynamic method for evaluation of rigidity of horizontal weld two-layer composite of beams.....	147
<i>Kobzev I.O., Pakholkin E.V.</i> About probe possibility of speed of destruction the greases by the electric method, in the defined maximum temperature in the friction zone.....	152
<i>Mishin V.V., Molodtsov E.N.</i> To a question of the estimation action rrs and modifiers of a friction surfaces on parametres of a electric resistance.....	159
<i>Vasilyev A.M.</i> Estimation of efficiency of the complex quality assurance in the distributed information-measuring systems.....	167

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

УДК 536.463

Ю.Х. ПОЛАНДОВ, М.А. БАРГ, В.А. БАБАНКОВ

О ВЫГОРАНИИ ГАЗО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАКРЫТОЙ ЕМКОСТИ С ПЕРЕГОРОДКОЙ

Вычислительными экспериментами с использованием метода крупных частиц показано, что наличие сужения в закрытом объеме может сократить время выгорания газо-воздушной смеси до трех раз.

Ключевые слова: воспламенение газа, замкнутый объем, время выгорания, влияние формы объема.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя время выгорания газовых смесей не является нормативным параметром, характеризующим этот процесс, оно является достаточно емким показателем и потому к нему достаточно часто обращаются при решении многих технических задач. Предлагаемая математическая модель, использующая этот параметр, позволяет достаточно уверенно решить часть из них, в том числе относящихся к оценке влияния особенностей формы объема, например, перегородки с отверстиями на процесс распространения пламени.

1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Модель основана на решении систем дифференциальных уравнений, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии, методом крупных частиц, разработанным Давыдовым Ю.М [1]. Расчет распространения пламени строится на многократно экспериментально подтвержденных данных о скорости нормального горения в газовой среде [2, 3].

Для случая идеального сжимаемого невязкого газа взаимосвязь параметров газодинамической системы можно описать дифференциальными уравнениями Эйлера в дивергентном виде (уравнения неразрывности, импульса и энергии). Для трехмерного случая система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0; \\ \frac{\partial \rho U_x}{\partial t} + \text{div}(U_x \rho \vec{U}) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial \rho U_y}{\partial t} + \text{div}(U_y \rho \vec{U}) + \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \rho U_z}{\partial t} + \text{div}(U_z \rho \vec{U}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(E \rho \vec{U}) + \text{div}(p \vec{U}) = 0; \end{array} \right.$$

Система замыкается уравнением состояния:

$$p = \rho I (\gamma - 1);$$

$$I = E - \frac{U^2}{2};$$

$$U^2 = U_x^2 + U_y^2 + U_z^2;$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

\vec{U} – вектор скорости, м/с;

E – удельная полная энергия, Дж/кг;

p – давление, Па.

γ – показатель адиабаты среды;

I – удельная внутренняя энергия, Дж/кг;

U_x, U_y, U_z , – составляющие вектора скорости, соответственно, вдоль осей X, Y, Z , м/с.

Считается, что смесь предварительно перемешана и она стехиометрична. Кроме того, приняты следующие допущения:

1. исходная топливная смесь является однородной;
2. различие термодинамических характеристик исходной смеси и продуктов горения является незначительным;
3. реакция горения протекает на границе несгоревшей смеси и продуктов горения – в области фронта горения.

С учетом указанных допущений, задача может быть сведена к моделированию динамики среды с единими свойствами. Для этого вводится дополнительный параметр состояния ячейки расчетной сетки – массовая доля продуктов горения f . В соответствии с методом крупных частиц, моделируемое пространство разбивается на совокупность ячеек. Долю продуктов горения f для каждой ячейки можно определить из выражения:

$$f = \frac{m_B}{m},$$

где m – общая масса смеси в ячейке, кг;

m_B – масса продуктов горения в ячейке, кг.

При этом расчетные ячейки можно разделить на три группы:

4. ячейки с исходной смесью, для которых выполняется условие $f < \varepsilon$, где ε – параметр точности расчетов;
5. «сгоревшие» ячейки – $f > 1 - \varepsilon$;
6. «горящие» ячейки.

Моделирование горения производится в три шага. На первом шаге рассматривается горение газа в ячейках. Для всех «горящих» ячеек определяется доля газа Δf , сгоревшего за время Δt , и рассчитывается выделение энергии ΔE :

$$\Delta m_B = m k_B;$$

$$\Delta f = \frac{\Delta m_B}{m} = k_B;$$

$$f_* = f + \Delta f;$$

$$\Delta E = \Delta m_B H;$$

$$E_* = E + \frac{\Delta E}{m} = E + k_B H;$$

где k_B – коэффициент скорости горения смеси;

E – удельная полная энергия смеси в ячейке, Дж/кг;

ΔE – абсолютное выделение энергии, Дж;

H – теплотворная способность смеси, Дж/кг;

f_* и E_* – соответственно доля продуктов горения и полная удельная энергия после этапа «горения».

Коэффициент скорости горения смеси k_B предлагается определять для каждой ячейки на каждом шаге согласно выражению:

$$k_B = \frac{\Delta t}{\Delta l} U_B,$$

где Δl – пространственный шаг сетки, м;

U_B – нормальная скорость распространения пламени в неподвижной смеси, м/с.

Зависимость нормальной скорости горения от относительного изменения температуры смеси описывается выражением:

$$U_B = U_{BNC} \left(\frac{T}{T_{NC}} \right)^\beta,$$

где U_{BNC} – нормальная скорость распространения пламени в неподвижной смеси при нормальных условиях, м/с;

T и T_{NC} – текущая температура смеси и температура смеси при нормальных условиях, соответственно, К;

β – показатель степенной зависимости.

Текущая температура смеси может быть определена из уравнения состояния идеального газа:

$$T = \frac{P\mu}{\rho R},$$

где μ – молярная масса смеси, кг/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К*моль).

Второй шаг моделирования заключается в распространении горения на соседние ячейки. Третий шаг заключается в учете переноса массы сгоревшего газа через границы ячеек.

В предлагаемой модели среда понимается как имеющая две несмешиваемые фазы – несгоревшая смесь и продукты горения, разделенные поверхностью фронта горения. При этом для определения значений степени сгорания f , переносимых, через границу ячейки, достаточно знать характер пересечения границы поверхностью фронта.

Перенос параметра f происходит согласно формуле:

$$f_{i+\frac{1}{2},j,k} = \begin{cases} 1, & (f_{i,j,k} > 1 - \varepsilon) \vee (f_{i+1,j,k} > 1 - \varepsilon); \\ 0, & (f_{i,j,k} < \varepsilon) \vee (f_{i+1,j,k} < \varepsilon); \\ \frac{f_{i,j,k} + f_{i+1,j,k}}{2}, & \end{cases}$$

2 ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Для проверки адекватности модели проведена серия физических опытов. Установка для проведения экспериментов представляет собой модель цилиндрическую камеру (длина рабочей полости – 1500 мм, диаметр – 200 мм, объем – $4,8 \cdot 10^{-2}$ м³). Для заполнения установки воздухом и газом, а так же для сброса продуктов горения установка оборудована кранами. Вентиляционный контур служит для перемешивания топливовоздушной смеси внутри установки с помощью вентиляторов (рис. 1). Воспламенение топливно-воздушной смеси производится оператором дистанционно при помощи искрового устройства зажигания, расположенного на торцевом фланце.

Предварительно проведенные опыты для установочного физического эксперимента позволили выявить и учесть влияния температуры на скорость распространения пламени, а также оценить теплотери через стенки объема, при этом получены следующие данные: коэффициент тепловых потери за счет конвекции $\alpha = 0,4$ Вт/(К·м²), степень тепловых потерь за счет излучения $\theta = 2$, степень зависимости нор-



Рисунок 1 – Общий вид установки «Сержант-1»

мальной скорости горения от температуры $\beta = 1,2$, которые обеспечили приемлемую адекватность модели (рис. 2). Более подробно вопрос об оценке адекватности данной модели освещен в статье [4].

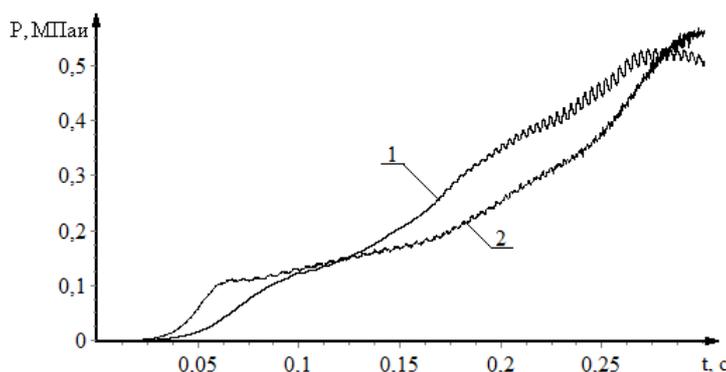


Рисунок 2 – Сравнение результатов экспериментов численного (2) и физического (1)

3 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТИ НА ВРЕМЯ ВЫГОРАНИЯ ГАЗО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Для определения влияния геометрических параметров емкости на время выгорания газо-воздушной смеси были проведено численное моделирование взрывов в закрытом объеме с сужением (рис. 3). Время выгорания определяется как интервал времени между зажиганием смеси и прекращением горения.

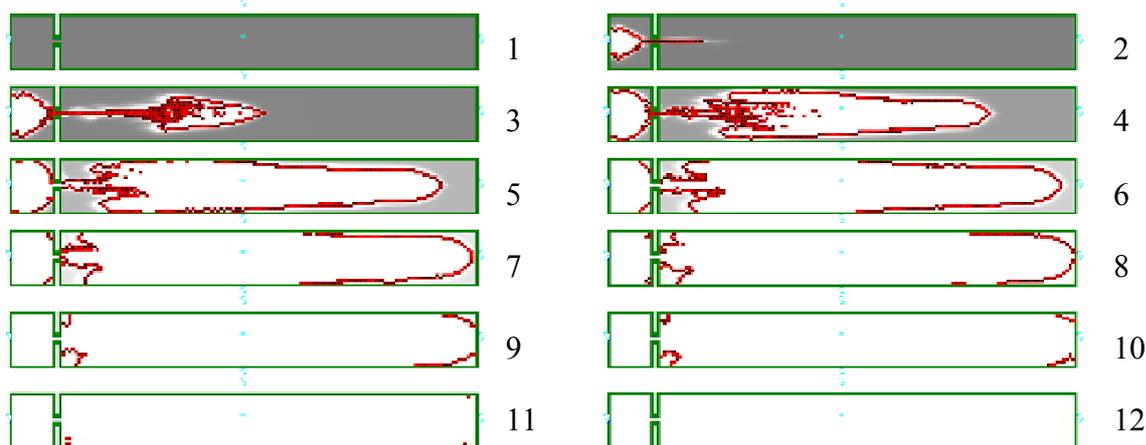


Рисунок 3 – Моделирование распространения фронта пламени в замкнутом объеме при наличии сужения $s = 0,95$ мм

Моделирование производилось при диаметрах отверстия перегородки d , равных 4, 5, 6, 7, 13, 32, 50, 300 мм, для однородной смеси пропан-бутан-воздух. Зависимость времени выгорания газо-воздушной смеси от величины сужения s приведена на рисунке 4.

Перегорodka с сужением «располагается» на расстоянии 150 мм от левой стенки цилиндрической емкости, возле которой производится зажигание. Степень сужения s определяется как

$$s = 1 - \frac{d}{D},$$

где d – диаметр отверстия в перегородке;

D – диаметр емкости.

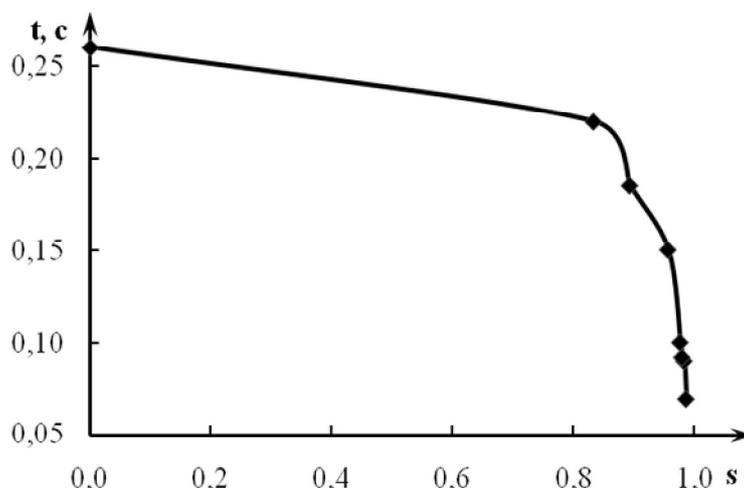


Рисунок 4 – Зависимость времени выгорания газовой смеси от сужения емкости

Из рисунка 4 видно, что с увеличением сужения, его влияние на время выгорания увеличивается, причем это влияние наиболее выражено при уменьшении поперечного сечения более 80%. При величине сужения более 0,95 время выгорания газовой смеси уменьшается более чем в 3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов, Ю.М. Аэродинамика, гидроупругость и устойчивость полета парашютных систем. Авиатика мягких летательных аппаратов / Ю.М. Давыдов. – Изд-е 3-е, доп. и перераб. – М.: НАПН РФ, НИИ парашютостроения, 2005. – 364 с.
2. Мольков, В.В. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения / В.В. Мольков, Ю.П. Некрасов // Физика горения и взрыва. – 1981. – т. 17. – №4. – С. 17-24.
3. Водяник, Б.И. Динамика развития взрывов в замкнутых объемах / Б.И. Водяник. – Обзор инф. Сер.: Техника безопасности, М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 33 с.
4. Поландов, Ю.Х. Моделирование процесса горения газовой смеси методом крупных частиц / Ю.Х. Поландов, М.А. Барг, С.А. Власенко // Пожаро-взрывобезопасность: Научно-технический журнал ООО «Издательство «Пожнаука», 2007. – Т. 16. – № 3. – С. 6–9.

Поландов Юрий Христофорович

Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс
 Доктор технических наук, профессор, преподаватель кафедры «Высшая математика»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 тел. (4862) 41-32-95
 E-mail: polandov@yandex.ru

Барг Михаил Аркадьевич

ООО "Космиго"
 Кандидат технических наук, ведущий программист ООО "Космиго"
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 тел. (4862) 41-32-95
 E-mail: mikemyri@yandex.ru

Бабанков Виталий Александрович

Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс
 Аспирант при кафедре «Высшая математика»
 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
 тел. (4862) 41-32-95
 E-mail: xenos1987@mail.ru

Yu.Kh. POLANDOV, M.A. BARG, V.A. BABANKOV

ABOUT BURNING OUT OF THE GAZO-AIR MIX IN THE CLOSED CAPACITIES WITH THE PARTITION

Results of computational experiments held using the large particles method show that presence of narrowing in the enclosed volume reduces burning time of stoichiometric gas-air mixture more than three times.

Key words: gas explosion, closed volume, time burnout, influence of the volume forms.

BIBLIOGRAPHY

1. Davydov, Ju.M. Ajerodinamika, gidrouprugost' i ustojchivost' poleta parashjutnyh sistem. Aviati-ka mjagkih letatel'nyh apparatov / Ju.M. Davydov. – Izd-e 3-e, dop. i pererab. – M.: NAPN RF, NII parashju-tostroenija, 2005. – 364 s.
2. Mol'kov, V.V. Dinamika sgoranija gaza v postojannom ob#eme pri nalichii istechenija / V.V. Mol'kov, Ju.P. Nekrasov // Fizika gorenija i vzryva. – 1981. – t. 17. – №4. – S. 17-24.
3. Vodjanik, B.I. Dinamika razvitija vzryvov v zamknutyh ob#emah / B.I. Vodjanik. – Obzor inf. Ser.: Tehnika bezopasnosti, M.: NIITJeHIM, 1982. – 33 s.
4. Polandov, Ju.H. Modelirovanie processa gorenija gazo-vozdushnoj smesi metodom krupnyh chastic / Ju.H. Polandov, M.A. Barg, S.A. Vlasenko // Pozharo-vzryvobezopasnost': Nauchno-tehnicheskij zhurnal OOO «Izdatel'stvo «Pozhnauka», 2007. – T. 16. – № 3. – C. 6–9.

Polandov Yury Khristoforovich

State University – Education Science Production Complex
Doctor of technical science, professor, teacher of department “High Mathematics”
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,
Tel.: 4862-41-32-95
E-mail: polandov@yandex.ru

Barg Michail Arkadyevich

LLC “Kosmigo”
Candidate of technical science, leading programmer of LLC “Kosmigo”,
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,
Tel.: 4862-41-32-95
E-mail: mikemvpi@yandex.ru

Babankov Vitaly Aleksandrovich

State University – Education Science Production Complex
Post-graduate student of department “High Mathematics”
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,
Tel.: 4862-41-32-95
E-mail: xenos1987@mail.ru

В.В. СОЛДАТКИН, А.В. НИКИТИН

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВОЗДУШНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕРТОЛЕТА С НАБЛЮДАТЕЛЕМ ЛЮЭНБЕРГЕРА

Рассматриваются особенности построения, математические модели и результаты имитационного моделирования аэромеханической системы вычисления составляющих вектора истинной воздушной скорости вертолета по уравнениям «застывшего» вертолета с использованием наблюдателя Люэнбергера, которую предлагается комплексировать с системой измерения малых воздушных скоростей вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника.

Ключевые слова: вертолет, малые воздушные скорости, измерение, комплексная система, наблюдатель Люэнбергера.

ВВЕДЕНИЕ

Полеты вертолетов происходят в приземном слое атмосферы и для их безопасного выполнения необходима информация о величине и направлении вектора истинной воздушной скорости.

Измерение параметров вектора истинной воздушной скорости вертолета затрудняется значительными искажениями, вносимыми индуктивными потоками несущего винта, особенно в области малых скоростей полета, когда фюзеляж и установленные на нем приемники аэрометрической информации находятся в створе вихревой колонны. При этом пространственный характер потока, воспринимаемого приемниками, а также способность вертолета совершать движение вперед-назад, вправо-влево и полет на режимах висения ограничивают использование традиционных для самолетов средств измерения.

Одним из направлений решения данной проблемы является построение системы измерения малых воздушных скоростей вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и струйно-конвективных измерительных каналов преобразования первичной аэрометрической информации [1]. Для эффективного снижения случайных динамических погрешностей и расширения нижней границы рабочих скоростей предлагается использовать принципы комплексирования [2]. Для формирования дополнительной информации о составляющих вектора истинной воздушной скорости вертолета предлагается использовать аэромеханическую измерительно-вычислительную систему, работа которой основывается на уравнениях равновесия аэродинамических и инерционных сил, силы тяжести и тяги вертолета и моментов этих сил на установившихся (балансировочных) режимах полета.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЭРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для установившегося режима полета составляющие V_x , V_y и V_z вектора \vec{V}_e истинной воздушной скорости вертолета в связанной системе координат можно представить в виде аналитических функций продольного δ_x и поперечного δ_z отклонений автомата перекоса, положения $\delta_{o.w}$ общего шага несущего винта и положения $\delta_{p.v}$ рулевого винта. Измеряя положение органов управления с помощью соответствующих датчиков линейного и углового перемещения, можно определить составляющие вектора истинной воздушной скорости вертолета.

К важному достоинству такой аэромеханической системы определения параметров вектора истинной воздушной скорости вертолета относится слабая чувствительность к влиянию внешних условий эксплуатации, так как все датчики первичных сигналов размещаются внутри вертолета, а также возможность измерения в области малых скоростей полета. Однако для такой системы характерны потери точности на нестационарных режимах и при вертикальном полете. Кроме того, раздельное вычисление продольной V_x , вертикальной V_y и поперечной V_z составляющих вектора воздушной скорости из-за интегрально сложного реального

движения вертолета не позволяет достичь удовлетворительной точности в широком диапазоне скоростей. При этом нелинейные связи отклонений органов управления и углов положения вертолета также приводят к снижению точности вычисления составляющих вектора воздушной скорости и к возрастанию динамических погрешностей.

Для снижения указанных недостатков аэромеханической системы предлагается использовать динамический оператор-наблюдатель Люэнбергера, который на основе математической модели движения вертолета по известным (хорошо измеряемым) параметрам движения позволяет определить неизвестные (плохо измеряемые) параметры состояния динамического объекта [3]. При этом наблюдатель Люэнбергера позволяет учесть изменяющиеся в зависимости от режима полета характеристики вертолета в используемой модели его движения.

Применяя метод пространства состояния, динамику движения вертолета и работу аэромеханической измерительно-вычислительной системы можно описать векторно-матричными уравнениями вида

$$\dot{X} = AX + BU; \quad Y = CX, \quad (1)$$

где A – матрица системной характеристики вертолета как объекта управления;

$X = [V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \vartheta, \gamma, \psi]^T$ – вектор состояния вертолета;

B – матрица управления;

$U = [\delta_x, \delta_z, \delta_{о.ш}, \delta_{р.в}]^T$ – вектор управления;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно связанной системы координат;

ϑ, γ, ψ – углы тангажа, крена и рыскания вертолета;

C – матрица измерительной системы, контролирующей фазовые координаты вектора состояния X .

На основе системы (1) строится модель динамического оператора-наблюдателя Люэнбергера с тем же управлением U , что и процесс движения вертолета. Благодаря обратной связи с матрицей усиления K , характеристики наблюдателя Люэнбергера подбираются таким образом, чтобы минимизировать разность $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ измеренных Y и оцененных наблюдателем \hat{Y} выходных величин. В этом случае система уравнений, описывающих работу наблюдателя Люэнбергера, будет иметь вид

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + BU + KC(X - \hat{X}). \quad (2)$$

При решении задачи определения составляющих вектора истинной воздушной скорости вертолета наблюдатель Люэнбергера, реализующий систему (2), обладает некоторой избыточностью, так как позволяет оценить все компоненты вектора состояния X . Так как компоненты $\omega_x, \omega_y, \omega_z, \vartheta, \gamma, \psi$ достаточно точно определяются по результатам их измерения по выходному сигналу Y измерительной системы, то для устранения избыточности необходимо построить наблюдатель Люэнбергера, порядок которого ниже, чем порядок наблюдаемого вектора состояния X .

Если вектор Y выходных сигналов измерительной системы, поддающихся измерению с достаточной точностью, имеет порядок r , то для оценки n -мерного вектора состояния X достаточно синтезировать наблюдатель Люэнбергера порядка $n-r$, характеризуемый вектором Z размерности $n-r$.

Введем в рассмотрение матрицу T размерности $(n-r) \times r$, преобразующую вектор X в вектор Z , тогда оценку \hat{X} вектора состояния X вертолета можно определить из уравнения

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} T \\ C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z \\ Y \end{bmatrix}.$$

При допущении, что r выходов измерительной системы линейно независимы, путем

замены переменных матрицу C можно представить в виде

$$C = [I \ O], \quad (3)$$

где I – единичная матрица размерности $r \times r$;

O – матрица размерности $r \times (n-r)$, все элементы которой равны нулю.

Указанную выше замену переменных можно обеспечить, используя матрицу D размерности $(n-r) \times r$, при которой матрица $M = [C \ D]^T$ будет являться неособой, причем подбором элементов матрицы M матрицу C можно привести к виду (3). Тогда вектор состояния вертолета представим в виде

$$X = \begin{bmatrix} Y \\ W \end{bmatrix},$$

где Y – вектор точно измеряемых фазовых координат вектора состояния X ;

W – вектор размерности $n-r$ фазовых координат, оцениваемых наблюдателем Люэнбергера.

Представляя матрицу A , входящую в выражение (2), в виде

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где матрица A_{11} имеет размерность $r \times r$,

тогда с учетом выражения (4) первое уравнение в системе (1) запишем как

$$\dot{Y} = A_{11}Y + A_{12}W + B_1U; \quad (5)$$

$$\dot{W} = A_{21}Y + A_{22}W + B_2U.$$

Так как вектор Y хорошо измеряем, то можно определить производную \dot{Y} . Вектор управления U также хорошо измеряем, поэтому из первого уравнения системы (5) находим член $A_{12}W$.

Отведем вектору $A_{12}W$ такую же роль, какую выполняет вектор $Y=CX$ во втором уравнении системы (1), а второе уравнение системы (5) подобно первому уравнению системы (1) будем рассматривать как наблюдаемый объект, характеризующийся вектором состояния W , который представляет собой не поддающуюся точному измерению часть вектора состояния X исходного объекта – вертолета и имеет в качестве хорошо измеряемого члена слагаемое $A_{21}Y - B_2U$. Синтезируя наблюдатель Люэнбергера для объекта, описываемого уравнением

$$\dot{W} = A_{21}Y + A_{22}W + B_2U, \quad (6)$$

можно определить вектор W и тем самым решить задачу оценки плохо измеряемых составляющих вектора состояния вертолета.

Подставляя в уравнение наблюдателя Люэнбергера вида (2) вместо A , C и K соответственно A_{22} , A_{12} и L , где L – матрица коэффициента усиления обратной связи, и учитывая, что в наблюдаемом объекте (6) роль выходного сигнала выполняет член

$$A_{22}W = \dot{W} - A_{21}Y - B_2U,$$

получим следующее уравнение наблюдателя Люэнбергера $(n-r)$ -го порядка

$$\dot{\hat{W}} = (A_{22} - LA_{12})\hat{W} + L[\dot{Y} - A_{11}Y - B_1U] + A_{21}Y + B_2U. \quad (7)$$

Дифференцирование вектора Y можно избежать, если систему (7) представить в виде

$$\dot{Z} = (A_{22} - LA_{12})Z + (A_{22} - LA_{12})LY + (A_{21} - A_{11})Y + (B_2 - LB_1)U, \quad (8)$$

где $Z = \hat{W} - LY$ – вектор наблюдения размерности $n-r$;

\hat{W} – выходной вектор наблюдателя Люэнбергера $(n-r)$ -го порядка.

Уравнение (8) можно представить в более сжатом виде

$$\dot{\mathbf{Z}} = (A_{22} - LA_{12})\mathbf{Z} + [(A_{22} - A_{12})(B_2 - LB_1)] \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}\mathbf{Z} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\mathbf{Q} = (A_{22} - LA_{12})$; $\mathbf{R} = (A_{21} - A_{11})(B_2 - LB_1)$.

Соотношение (9) позволяет оценить составляющие V_x , V_y и V_z вектора истинной воздушной скорости вертолета в аэрометрической измерительно-вычислительной системе с использованием наблюдателя Люэнбергера пониженного порядка. При этом в вычислитель, моделирующий движение вертолета, подаются хорошо измеряемые данные о положении органов управления $\delta_x, \delta_z, \delta_{o.u}, \delta_{p.e}$, об угловых скоростях $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ вращения вертолета относительно осей связанной системы координат, об углах крена γ , тангажа ϑ и рыскания ψ . По предварительно вычисленным значениям составляющих V_{x0}, V_{y0} и V_{z0} вектора истинной воздушной скорости и текущим значениям хорошо измеряемых параметров осуществляется адаптация используемых математических моделей движения вертолета к реальному режиму полета. Затем на основе измеренных и вычисленных данных о состоянии вертолета определяются уточненные значения продольной V_x , вертикальной V_y и поперечной V_z составляющих вектора \bar{V}_e воздушной скорости.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Моделирование аэромеханической системы определения составляющих вектора истинной воздушной скорости с наблюдателем Люэнбергера пониженного порядка проведено применительно к легкому вертолету.

Система уравнений, описывающая динамику движения вертолета, представлена в виде

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= -\omega_y V_z + \omega_z V_y + m^{-1}(-H - X_{пл} - mg \sin \vartheta); \\ \dot{V}_y &= -\omega_z V_x + \omega_x V_z + m^{-1}(T + Y_{пл} - mg \cos \gamma \cos \vartheta); \\ \dot{V}_z &= -\omega_x V_y + \omega_y V_x + m^{-1}(-S - T_p + Z_{пл} - mg \sin \gamma \cos \vartheta); \\ \dot{\omega}_x &= I_x^{-1}(M_{xH} + M_{xp.v} + M_{x\phi} + M_{x\Gamma} + M_{xB}); \\ \dot{\omega}_y &= I_y^{-1}(M_{yH} + M_{yp.v} + M_{y\phi} + M_{y\Gamma} + M_{yB}); \\ \dot{\omega}_z &= I_z^{-1}(M_{zH} + M_{zp.v} + M_{z\phi} + M_{z\Gamma} + M_{zB}); \\ \dot{\vartheta} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x - (\omega_y \cos \gamma + \omega_z \sin \gamma) \operatorname{tg} \vartheta; \\ \dot{\psi} &= (\omega_y \cos \gamma + \omega_z \sin \gamma) \frac{1}{\cos \vartheta}, \end{aligned} \quad (10)$$

где T, H, S – тяга несущего винта, продольная и боковая силы, действующие на вертолет;

$X_{пл}, Y_{пл}, Z_{пл}$ – аэродинамические силы планера;

M_{xH}, M_{yH}, M_{zH} – составляющие суммарного момента на втулке несущего винта;

$M_{xp.v}, M_{yp.v}, M_{zp.v}$ – составляющие момента, создаваемого рулевым винтом;

$M_{x\phi}, M_{y\phi}, M_{z\phi}$ – компоненты аэродинамического момента фюзеляжа;

$M_{x\Gamma}, M_{y\Gamma}, M_{z\Gamma}$ – компоненты аэродинамического момента горизонтального оперения;

M_{xB}, M_{yB}, M_{zB} – компоненты аэродинамического момента вертикального оперения;

I_x, I_y, I_z – моменты инерции вертолета относительно осей связанной системы координат;

m – масса вертолета;

g – ускорение свободного падения.

На установившихся (балансировочных) режимах полета с использованием градиентов функций в точке балансировки вместо нелинейной системы (10) при моделировании использована линеаризованная система уравнений вертолета вида

$$\dot{\nabla} x_j = \{a_{ij}\}_{8 \times 8} \nabla x_j + \{b_{ij}\}_{8 \times 4} \nabla \delta_j,$$

где ∇x_j – приращения фазовых координат;

$\nabla \delta_j$ – приращения управляющих параметров;

a_{ij} – коэффициенты при фазовых координатах;

b_{ij} – коэффициенты при управляющих воздействиях.

На рисунке 1 приведены графики изменения составляющих V_x , V_y и V_z вектора истинной воздушной скорости легкого вертолета и погрешностей ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z аэромеханической системы с наблюдателем Люэнбергера для балансировочного режима с параметрами: $m = 3000$ кг; $V = 100$ км/ч; $H = 0$; $V_{x0} = 27,74$ м/с; $V_{y0} = -1,38$ м/с; $V_{z0} = 0,06$ м/с; $\delta_{x0} = -0,0104$ рад; $\delta_{z0} = -0,0282$ рад; $\delta_{o.ш0} = 0,1195$ рад; $\delta_{p.в0} = 0,1093$ рад.

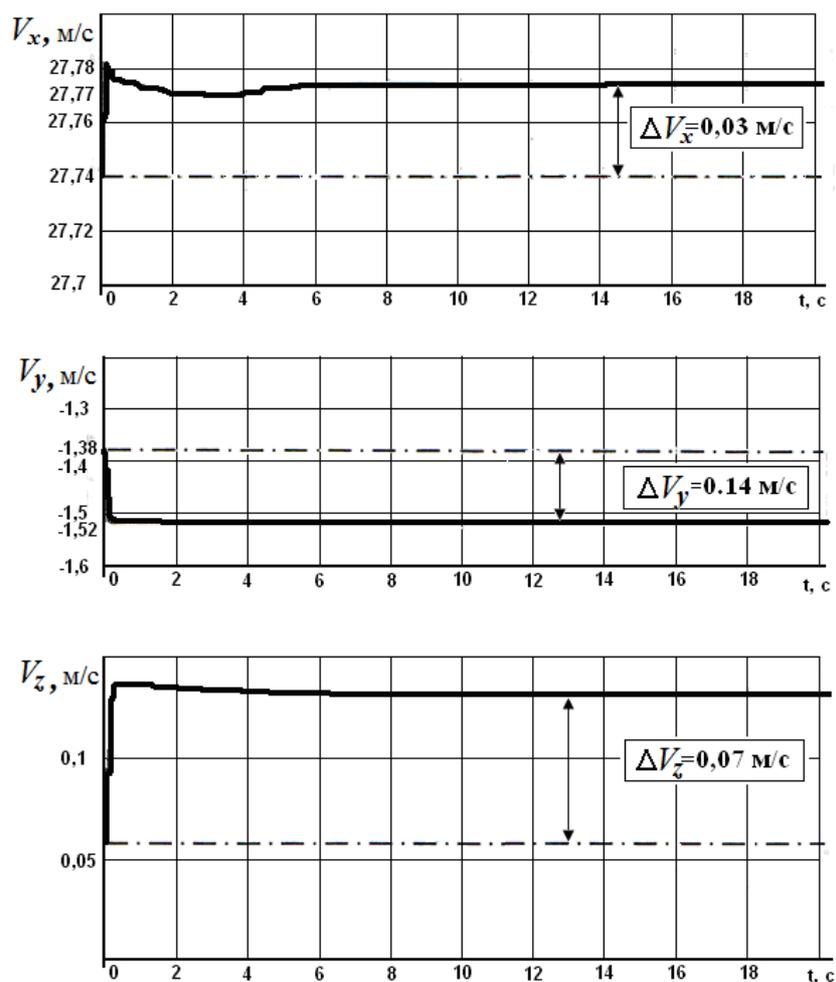


Рисунок 1 – Графики измерения составляющих вектора истинной воздушной скорости и погрешностей аэромеханической системы с наблюдателем Люэнбергера

В таблице 1 приведены значения остаточных погрешностей определения составляющих вектора истинной воздушной скорости вертолета с использованием аэромеханической измерительно-вычислительной системы с наблюдателем Люэнбергера для различных балансировочных режимов полета.

Максимальную погрешность ΔV_B определения величины (модуля) вектора истинной воздушной скорости вертолета с использованием аэромеханической измерительно-вычислительной системы можно оценить выражением $\Delta V_B = \Delta V_x + \Delta V_y + \Delta V_z = 0,44 \text{ м/с} = 1,58 \text{ км/ч}$.

Таблица 1 – Погрешности аэромеханической системы с наблюдателем Люэнбергера

Величина погрешности, м/с	Скорость $V_{в}$, км/ч					
	100	140	180	220	260	280
ΔV_x , м/с	0,03	0,045	0,07	0,1	0,17	0,17
ΔV_y , м/с	0,14	0,010	0,014	0,16	0,19	0,19
ΔV_z , м/с	0,07	0,07	0,08	0,075	0,08	0,08

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ

Для оценки остаточных погрешностей комплексной системы измерения малых воздушных скоростей вертолета будем считать, что в выходных сигналах $V_{в1}(t)$ и $V_{в2}(t)$ комплексированных аэрометрической и аэромеханической систем присутствуют аддитивно наложенные на полезный сигнал случайные погрешности $\xi_1(t) = \Delta V_{в.а}$ и $\xi_2(t) = \Delta V_{в.а.м}$.

Опыт исследования аэрометрических систем измерения высотно-скоростных параметров вертолета показывает [4], что корреляционную функцию случайной погрешности канала измерения воздушной скорости можно представить в виде

$$K_{\xi_1}(\tau) = \sigma_1^2 e^{-a_1|\tau|} \left[\cos b_1 \tau + \frac{a_1}{b_1} \sin b_1 \tau \right], \quad (11)$$

где σ_1 , a_1 и b_1 – параметры, определяющие преобладающий уровень и спектр частот случайной погрешности аэрометрической системы.

Учитывая возможную мультипликативную погрешность измерения составляющих воздушной скорости вертолета аэромеханической системы с наблюдателем Люэнбергера, корреляционную функцию погрешности указанной системы представим в виде

$$K_{\xi_2}(\tau) = \sigma_2^2 e^{-a_2|\tau|} (1 + a_2|\tau|), \quad (12)$$

где σ_2 , a_2 – параметры, определяющие преобладающий уровень аддитивной и мультипликативной составляющей случайной погрешности аэромеханической системы с наблюдателем Люэнбергера.

Как известно [4], погрешность двухкомпонентной комплексной измерительной системы определяется параметрами одного из фильтров, так как структура и параметры другого фильтра становятся зависимыми от условия инвариантности. Следует ожидать, что погрешность аэромеханической измерительно-вычислительной системы определения составляющих воздушной скорости вертолета с наблюдателем Люэнбергера носит более высокочастотный характер, чем погрешность аэрометрической системы СИМВС-В.

При построении комплексной системы по схеме со следящей системой [5] передаточную функцию аэромеханической системы определения воздушных скоростей с наблюдателем Люэнбергера можно принять в виде колебательной модели:

$$W_1(p) = \frac{1 + 2\alpha T_1 p}{1 + 2\alpha T_1 p + T_1^2 p^2},$$

где α и T_1 – параметры передаточной функции.

Если ввести следующие обозначения для первого канала фильтрации $d_0 = T_1^2$; $d_1 = 2T_1(\alpha + a_1 T_1)$; $d_2 = 1 + (a_1^2 + b_1^2)T_1^2 + 4\alpha a_1 T_1$; $d_3 = 2[a_1 + \alpha T_1(a_1^2 + b_1^2)]$; $d_4 = (a_1^2 + b_1^2)$; $g_0 = g_1 = 0$; $g_2 = -4\alpha^2 T_1^2$; $g_3 = 1$, и для второго канала фильтрации $d_0 = T_1^2$; $d_1 = 2T_1(\alpha + a_2 T_1)$; $d_2 = 1 + a_2^2 T_1^2 + 4\alpha T_1$; $d_3 = 2[a_2 + \alpha a_2^2 T_1]$; $d_4 = a_2^4$; $g_0 = g_2 = g_3 = 0$; $g_1 = T_1^4$, тогда выражение для определения составляющих дисперсий остаточной погрешности комплексной системы принимает вид [5]

$$D_i = \frac{d_4 d_1 g_3 + g_3 (d_0 d_3 - d_1 d_2)}{2d_4 (d_0 d_3^2 + d_1^2 d_4 - d_1 d_2 d_3)}.$$

Значения составляющих остаточной погрешности комплексной системы измерения малых скоростей вертолета можно оценить на следующем числовом примере.

Пусть случайная погрешность определения воздушной скорости вертолета аэромеханической измерительно-вычислительной системы с наблюдателем Люэнбергера в области малых скоростей полета оценивается следующими значениями: $\sigma_2 = 1,5$ м/с, $a_2 = 0,01$ с⁻¹, а случайная погрешность определения воздушной скорости аэрометрической системы в указанном диапазоне скоростей определяется значениями $\sigma_1 = 3$ м/с, $a_1 = 1$ с⁻¹. Характеристики корректирующего фильтра зададим значениями $\alpha = 1$ с⁻¹, $T = 40$ с. Тогда при независимости случайных погрешностей комплексируемых систем дисперсия суммарной остаточной погрешности комплексной системы будет равна $D = D_1 + D_2 = 53,4 \cdot 10^{-2}$ (м/с)². Среднеквадратическое значение погрешности $\sigma_{V_a} = \sqrt{D} = 0,73$ м/с = 2,63 км/ч, предельная погрешность комплексной системы $\Delta_{\text{пред}} = \pm 3\sigma_{V_a} = \pm 7,79$ км/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, комплексирование аэрометрической системы измерения малых воздушных скоростей вертолета и аэромеханической измерительно-вычислительной системой с наблюдателем Люэнбергера позволяет существенно повысить точность измерения истинной воздушной скорости вертолета в области малых и околонулевых скоростей полета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин, В.В. Алгоритмы обработки информации системы измерения малых воздушных скоростей вертолета / В.В. Солдаткин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 2. – С. 62 – 66.
2. Солдаткин, В.В. Анализ комплексной системы измерения малых воздушных скоростей вертолета / В.В. Солдаткин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 52 – 57.
3. Пат. 0249848 ЕПВ (ЕР), МКП G 01P 5/00. System zur Bestimmung der Fluggeschwindigkeit von Hubschraubern / Muller B // Patentblatt, 1987.
4. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
5. Солдаткин, В.В. Синтез комплексной системы измерения малых воздушных скоростей вертолета / В.В. Солдаткин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. – 2004. – № 1. – С. 62 – 68.

Солдаткин Вячеслав Владимирович

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева
Кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»
Тел. (843) 236-51-21
E-mail: xli@piis.rstu-kai.ru

Никитин Александр Владимирович

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева
Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»
Тел. (843) 236-51-21
E-mail: xli@piis.rstu-kai.ru

V.V.SOLDATKIN, A.V. NIKITIN

COMPLEX SYSTEM FOR LOW HELICOPTER AIRSPEED MEASUREMENT WITH THE USE OF THE LUENBERGER OBSERVER

The features of construction, mathematical model and the results of imitating modeling an

aeromechanical calculation system of true helicopter airspeed vector components on the equations for a «stiffened» helicopter with use of Luenberger observer which is offered to be integrated with a measurement system of low helicopter airspeeds on the basis of stationary aerometric receiver are considered.

Key words: *helicopter, low airspeed, measurement, complex system, Luenberger observer.*

BIBLIOGRAPHY

1. Soldatkin, V.V. Algoritmy obrabotki informacii sistemy izmerenija malyh vozdushnyh skorostej vertoletov / V.V. Soldatkin // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2004. – № 2. – S. 62 – 66.
2. Soldatkin, V.V. Analiz kompleksnoj sistemy izmerenija malyh vozdushnyh skorostej vertoletov / V.V. Soldatkin // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2004. – № 3. – S. 52 – 57.
3. Pat. 0249848 EPV (ER), MKP G 01R 5/00. System zur Bestimmung der Fluggeschwindigkeit von Hubschraubern / Muller B // Patentblatt, 1987.
4. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2001. – 448 s.
5. Soldatkin, V.V. Sintez kompleksnoj sistemy izmerenija malyh vozdushnyh skorostej vertoletov / V.V. Soldatkin // Izvestija OrelGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie. – 2004. – № 1. – S. 62 – 68.

Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich

Kazan State technical university named after A.N.Tupolev

Candidate of technical science, associate professor, Ph.D. candidate of department “Devices and information and measuring systems”

Tel. 843-236-54-21

E-mail: xli@piis.rstu-kari.ru

Nikitin Aleksandr Vladimirovich

Kazan State technical university named after A.N.Tupolev

Post-graduate student of department “Devices and information and measuring systems”

Tel. 843-236-51-21

E-mail: xli@piis.rstu-kari.ru

И.Г. ГОГОЛЕВ, Т.А. НИКОЛАЕВА, А.М. ДРОКОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В КАНАЛАХ НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ ОСЕВЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ СРЕДНЕЙ ВЕЕРНОСТИ

Выполнены исследования структуры потока в каналах направляющих аппаратов осевых турбинных ступеней средней веерности, изложены рекомендации по снижению влияния вторичных течений на их экономичность.

Ключевые слова: турбинная ступень, направляющий аппарат, структура потока, пограничный слой, вихревое течение, потери энергии, отрыв потока.

В целях решения важнейшей для энергомашиностроительной отрасли задачи – дальнейшего повышения экономичности турбоблоков – необходимы углубленные исследования аэродинамических процессов, где приоритетным направлением является изучение структуры потока в проточной части турбомашин.

Достоверная оценка эффективности работы лопаточных аппаратов требует наличия конкретных сведений о количественном влиянии нестационарности, а потому детальные исследования причин формирования, характера и уровня неравномерности потока в каналах сопловых и рабочих решеток необходимы как для расчета их аэродинамических качеств, так и для конструктивного совершенствования.

Имея пространственно-градиентный характер, поток в кольцевых лопаточных решетках обладает интенсивным изменением параметров в радиальном, осевом и окружном направлениях и, как следствие, неравномерностью распределения энергетических потерь.

Очевидно, что основное формирование структуры потока в осевой активной турбинной ступени происходит в межлопаточных каналах направляющего аппарата (НА). Рассмотрим картину течения газа в его проточной части.

Поворот потока внутри канала вызывает поперечный градиент давления, продольный градиент создается перепадом давлений в решетке, а радиальный – воздействием центробежных сил. Вблизи концов лопаток в пограничных слоях на ограничивающих поверхностях каналов возникают сложные вторичные течения, причиной возникновения которых являются вязкость рабочего тела и разность давлений на их вогнутой (сторона А) и выпуклой (сторона Б) поверхностях.

В межлопаточном канале поперек направления движения теплоносителя давление уменьшается от стороны А какой-либо лопатки к стороне Б соседней лопатки. В средней по высоте части канала эта разность не вызывает перетеканий, так как поток уравнивается инерционными силами. На внешнем (периферийном) и внутреннем (корневом) обводах канала образуется пограничный слой (погранслой), за счет чего снижаются скорости течения и, соответственно, силы инерции. Поэтому вдоль торцевых поверхностей под влиянием разности давлений происходит перетекание энергоносителя. На спинке лопатки Б у периферии и в корневом сечениях радиальные градиенты давления, направленные к середине ее высоты, содействуют интенсификации вторичных течений. В результате в периферийной и корневой зонах канала формируются соответствующие вихревые течения, вращающиеся относительно осей, практически совпадающей с направлением основного потока, что, в свою очередь, вызывает деформацию полей давлений и скоростей за лопаточной решеткой. Так как компоненты радиальных вторичных течений в периферийной и корневой областях на вогнутой и выпуклой сторонах лопаток направлены встречно, то у выходных кромок последних формируется дополнительно вихревой слой, который оказывает влияние на организацию течения рабочего тела за лопаточной решеткой (рис. 1).

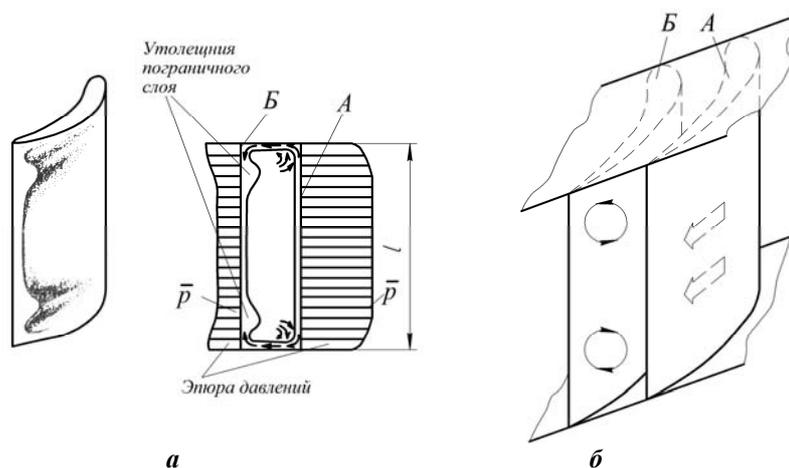


Рисунок 1 – Схемы образования вторичных течений в межлопаточном канале НА (А и Б – соответственно выгнутая и выпуклая поверхности НЛ)
 а – распределение толщины погранслоя и относительного давления рабочего тела \bar{p} в узком сечении решетки по высоте l НЛ;
 б – схема образования вторичных течений

Отмеченные особенности течения в направляющих решетках вызывают интенсивный рост потерь энергии в корневой и периферийной областях, причем зона повышенных потерь может занимать значительную часть высоты направляющей лопатки (НЛ). При этом резкое набухание погранслоя в корневых сечениях может привести к отрыву потока на этом участке. Анализируя физические процессы, вызывающие такой отрыв, следует отметить, что этому явлению могут способствовать диффузорные участки в косом срезе канала или за решеткой, недостатки в проектировании и изготовлении НА и последствия вышеописанных вторичных течений.

Следует также отметить, что на характер аэродинамических процессов в кольцевой лопаточной решетке оказывает влияние неравномерность полей температур торможения по радиусу проточной части, что является следствием вихревого эффекта (турбулентного переноса энергии). Это обстоятельство необходимо учитывать при тепловых расчетах и экспериментальных исследованиях турбинных ступеней.

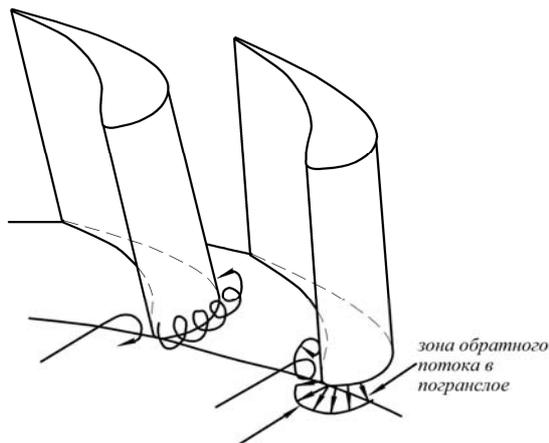


Рисунок 2 – Схема образования подковообразного вихря у входных кромок турбинных лопаток

Рассматривая входной участок канала решетки, можно установить, что в пограничном слое на переднем канте лопаток образуются подковообразные вихри (рис. 2). Кинетической энергии рабочего тела, попадающего в пределы этого погранслоя, оказывается недостаточно для преодоления возникшего гидросопротивления, а потому на входе в решетку перед лопатками образуются локальные зоны обратного тока. В результате взаимодействия основного потока с подковообразным вихрем в зоне торможения образуются две косы флюида, одна из которых (со стороны А) имеет вращательное движение в направлении к вышеописанному выходному вихрю и, сливаясь с ним, интенсифицирует его движение, в то время как ветвь со стороны Б вращается противоположно, что сказывается на структуре течений внутри межлопаточных каналов и за ними (рис. 1,2).

Причиной дополнительных вторичных течений также могут служить радиальные зазоры в корневой области НЛ (между их торцевой частью и поверхностью ротора) в направляющих аппаратах, лопаточные венцы которых закреплены в корпусе турбомашин в пери-

ферийном сечении, что наиболее характерно для газотурбинных установок (рисунок 3).

В этой области турбинной ступени за счет взаимодействия созданного в межлопаточном канале градиента давлений на сторонах А и Б НЛ, щелевого и основного потоков, а также высокоскоростного погранслоя на поверхности ротора, обладающих значительными кинетическими энергиями, формируются перетекания рабочего тела через корневую радиальную щель. Характер и интенсивность вихрей, а, следовательно, и уровень потерь энергии зависят от окружной скорости и геометрии поверхности ротора, параметров погранслоя, конструкции НЛ, величины радиального зазора, степени реакции ступени.

Наряду с теоретическим анализом физических процессов в ряде научных лабораторий были выполнены экспериментальные аэродинамические исследования турбинных решеток с целью детального изучения структуры потока в межлопаточных каналах НА, оказывающих существенное влияние на организацию рабочего процесса в ступени.

Анализ протекающих в турбинном отсеке физических процессов выполним с использованием материалов некоторых литературных источников, в которых изложены результаты исследований на динамических воздушных стендах ступеней средней верности паровых турбин с реакцией $\rho = 0, 2 \dots 0, 3$, где углубленно изучался характер потока в каналах НА [1...8].

При выполнении этих экспериментов замеры локальных скоростей энергоносителя (в трехмерной системе координат) проводились преимущественно посредством термоанемометров. Структура течений изучалась в окружном и радиальном направлениях межлопаточных каналов в ряде контрольных сечений их тракта (рис. 4).

Ниже рассматриваются основные характеристики потока рабочего тела в проточной части направляющих аппаратов (диафрагм), конструкция которых свойственна ступеням средней верности паровых турбин.

Одним их показателей организации течений в проточной части НА может служить распределение чисел Маха (M) в межлопаточном канале вдоль профиля сопловых лопаток в корневом, среднем и периферийном сечениях НА, проиллюстрированное на рисунке 5 в зависимости от относительной дуговой координаты x/s , где x - текущая координата средней линии соплового канала (отсчитывается от входной кромки), s - развертка сторон профиля НЛ. Как видно, числа M имеют наибольшие значения на выпуклой стороне Б лопаток и достигают максимальной величины в области их выходных кромок в корневом сечении ступени. На всем протяжении выпуклой поверхности лопатки до минимального сечения канала течение конфузорное, а потому толщина погранслоя меняется незначительно вплоть до косога среза, где градиенты давления приобретают положительные значения и происходит рост толщины потери импульса.

Рисунок 6 иллюстрирует результаты исследований вторичных течений вдоль межлопаточного канала в плоскостях сечений 8...32 (см. рис. 4). Так, регистрация параметров потока в сеч. 8 показала, что под воздействием подковообразного вихря у входных кромок сопловых лопаток уже на начальном участке канала возникают вторичные течения. Дальнейшее движение рабочего тела через решетку индуцирует в пограничном слое на поверхностях обводов постоянные вторичные токи, направленные к выпуклой стороне профиля.

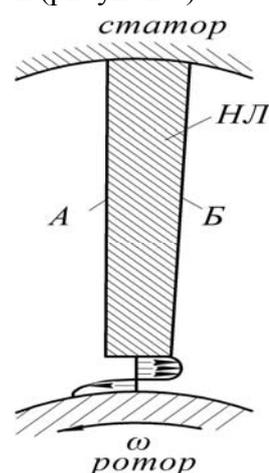


Рисунок 3 – Эюра скорости потока в радиальном зазоре между ротором и торцом НЛ

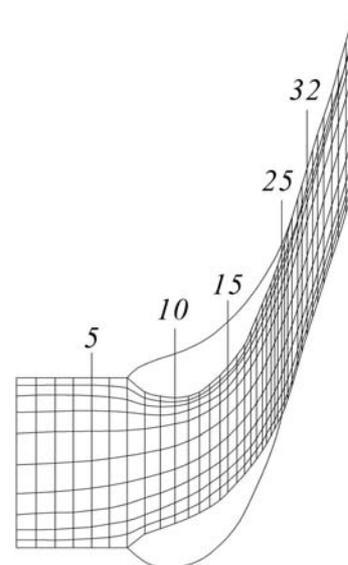


Рисунок 4 – Сечения измерений параметров потока в межлопаточном канале НА

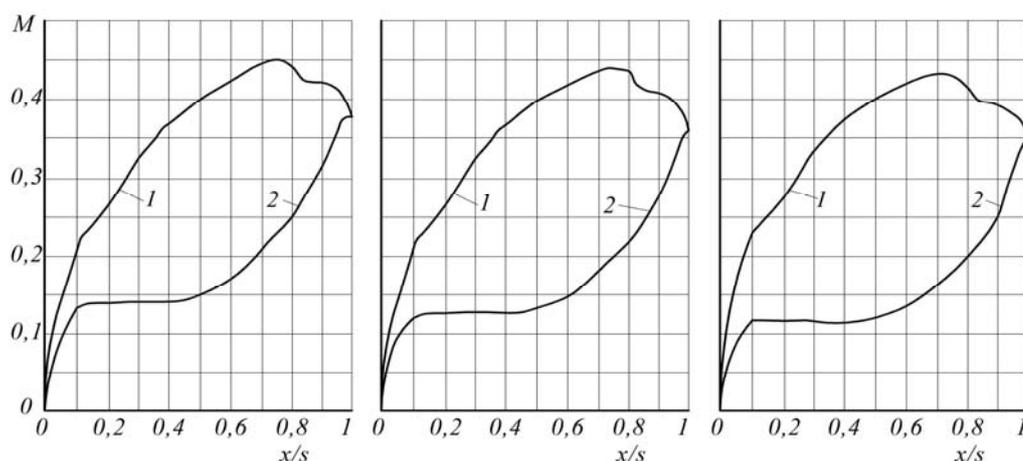


Рисунок 5 – Распределение чисел M по профилю сопловой лопатки в корневом (а), среднем (б) и периферийном (в) сечениях НА 1 и 2 – соответственно на выпуклой и вогнутой сторонах НЛ

По причине неразрывности в области перехода от выпуклой стороны лопатки к поверхности обвода НА они отклоняются в радиальном направлении и это формирует в канале две ярко выраженные (периферийную и корневую) вихревые системы.

В эти зоны подсасывается с вогнутой стороны А лопатки ветвь подковообразного вихря совместно с вихрем канала, в то время как противоположно вращающийся вихрь на выпуклой стороне Б приобретает достаточную для взаимодействия с основным потоком энергию лишь в области сеч. 10.

До выхода из решетки (сеч. 25) поперечные течения непрерывно нарастают, в результате чего векторы скорости вблизи поверхностей обводов практически совпадают с окружающими направлениями соответственно корневого и периферийного вихрей.

На выходе из НА (сеч. 32) эти составляющие немного ослабевают, так как отсутствует движущий их поперечный градиент давления, а силы трения в области втулки и корпуса снижают поперечные течения.

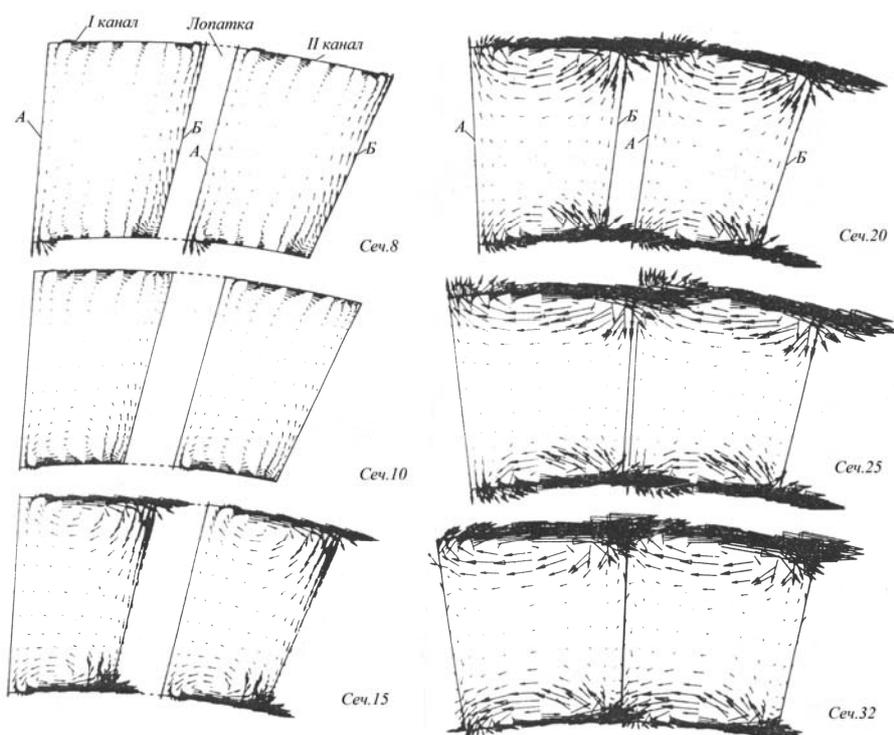


Рисунок 6 – Вторичные течения в контрольных сечениях 8,10,15,20,25 и 32 канала НА (рис.4) [7]

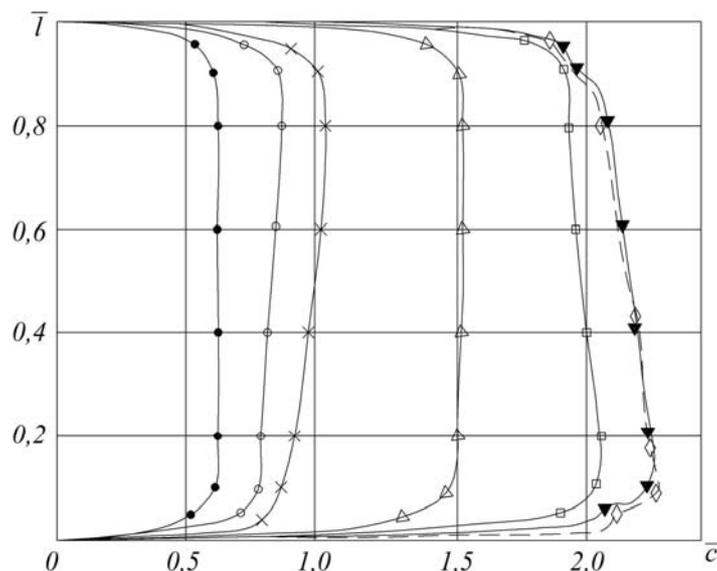


Рисунок 7 – Изменение скорости \bar{c} , осредненной по окружности в контрольных сечениях межлопаточного канала, по высоте НЛ
 ●—● - сеч.5; ○—○ - сеч.8; ×—× - сеч.10; Δ—Δ - сеч.15;
 □—□ - сеч.20; ▼—▼ - сеч.25; ◇—◇ - сеч.32 (рис.4)

Представленная картина аэродинамических процессов в НА ступени средней веерности может быть дополнена результатами траверсирования потока в окружном и радиальном направлениях межлопаточных каналов в контрольных сечениях 5...32 (см. рис. 4). Так, на рисунке 7 приведено изменение по радиусу в этих сечениях осредненной по шагу направляющего канала безразмерной скорости потока $\bar{c} = c/c_{cp}$, где c – скорость газа в точке замера; c_{cp} – средняя скорость в сеч. 10 НА. Как видно, на входе в направляющую решетку (сеч. 5) профиль скоростей по высоте канала имеет практически симметричный характер. До сеч. 10 ускорение потока в корневой области отстает от ускорения в периферийной части канала, причем этот процесс наблюдается начиная с входного участка сопловой решетки. Причиной тому является разделение потока в прикорневой области НА и связанное с этим его канальное запирание, что вызывает оттеснения газа к периферийному обводу проточной части. В корневой половине канала (за сеч. 10) этот эффект компенсируется за счет поворота потока и роста по данной причине поперечного градиента давления, что обеспечивает ускорение течений в этой области.

Отмеченные процессы являются также следствием функционирования парных вихрей в канале, которые благодаря компонентам поперечного течения воздействуют на градиенты скоростей в его тракте.

По результатам траверсирования потока в НА был рассчитан коэффициент потерь энергии ζ вдоль тракта решетки ступени средней веерности с использованием зависимости

$$\zeta = 2(p_o^* - p_i^*) / \rho c_o^2,$$

где p_o^* и p_i^* – полные давления потока соответственно перед решеткой и локальные значения в контрольных сечениях НА;

c_o – скорость потока перед НА;

ρ – плотность теплоносителя.

Результаты расчетов значений ζ по высоте каналов исследованных контрольных сечений НА (см. рис. 4) приведены на рисунке 8. Как видно, по тракту канала НА, имеет место постоянное нарастание потерь энергии. Всплеск коэффициента ζ в пристеночных областях наблюдается вблизи сеч. 25, где в области обводов его градиент резко возрастает и участок повышенных потерь энергии может занимать до 10% высоты канала. При этом характери-

стики потерь энергии в первой половине канала (по ходу теплоносителя) в корневой и периферийной зонах достаточно идентичны.

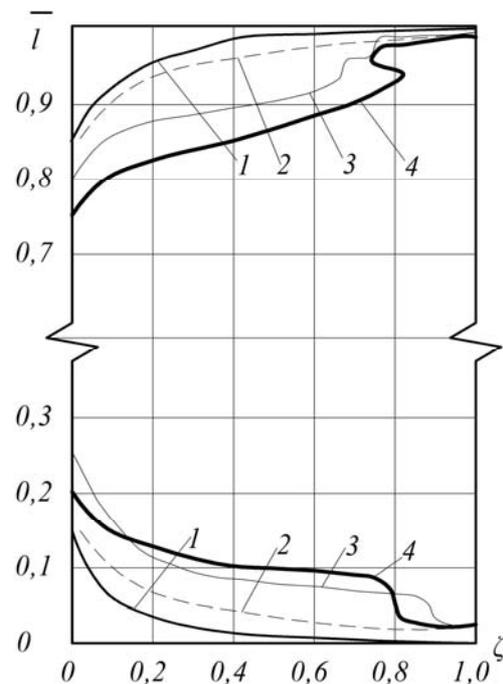


Рисунок 8 – Изменение коэффициента потерь энергии ζ , осредненного по шагу НА в контрольных сечениях канала, по высоте НЛ: 1, 2, 3 и 4 – соответственно в сечениях 8, 15; 25 и 32 (рисунок 4)

Во второй части канала (сеч. 25...32) вдоль его высоты наблюдаются два пика потерь, что является результатом интенсивных вихревых течений у торцевых поверхностях решетки и, как следствие, сопутствующих деформаций линий тока, роста толщины погранслоя и степени его турбулентности. Наиболее ярко это проявляется на выходе из решетки (сеч. 32), где у периферии формируется выраженный максимум энергетических потерь.

В рамках указанных экспериментальных исследований изучались также процессы течений теплоносителя вдоль поверхностей канала НА с использованием термоанемометра и искрового флюида (бенгальского огня), что позволило установить трехмерную картину потока в направляющих решетках турбинных ступеней. Так, рисунок 9а показывает характер течений в области втулки, где отчетливо наблюдается интенсивное ускорение потока в зоне сужения канала и при его истечении, а рисунок 9б иллюстрирует картину движения рабочего тела на периферии межлопаточного канала, которая оказывается достаточно адекватной картине течения у корневой поверхности.

Рисунок 10а демонстрирует аксиальные и радиальные компоненты скорости по высоте канала НА у вогнутой стороны направляющей лопатки. Торможение потока на переднем канте снижает скорости перед решеткой, особенно в периферийной области. В пределах решетки векторы скорости поворачиваются соответственно к корневому и периферийному обводам, чему содействуют оба концевых вихря. При этом градиент давления дополнительно индуцирует вторичные течения в направлении втулки.

У выпуклой стороны сопловой лопатки совершается обратный процесс (рис. 10б). Поперечные течения у торцев канала поворачивают линии тока от периферии в область среднего сечения турбинной ступени. Перенос теплоносителя из пограничных слоев снижает общую скорость его течения вдоль высоты решетки. Этот процесс не способствует радиальному равновесию потока и сформировавшийся в канале градиент давления индуцирует вторичные вихри в направлении втулки, которые сдерживаются встречными поперечными вихревыми течениями в корневой зоне межлопаточного канала.

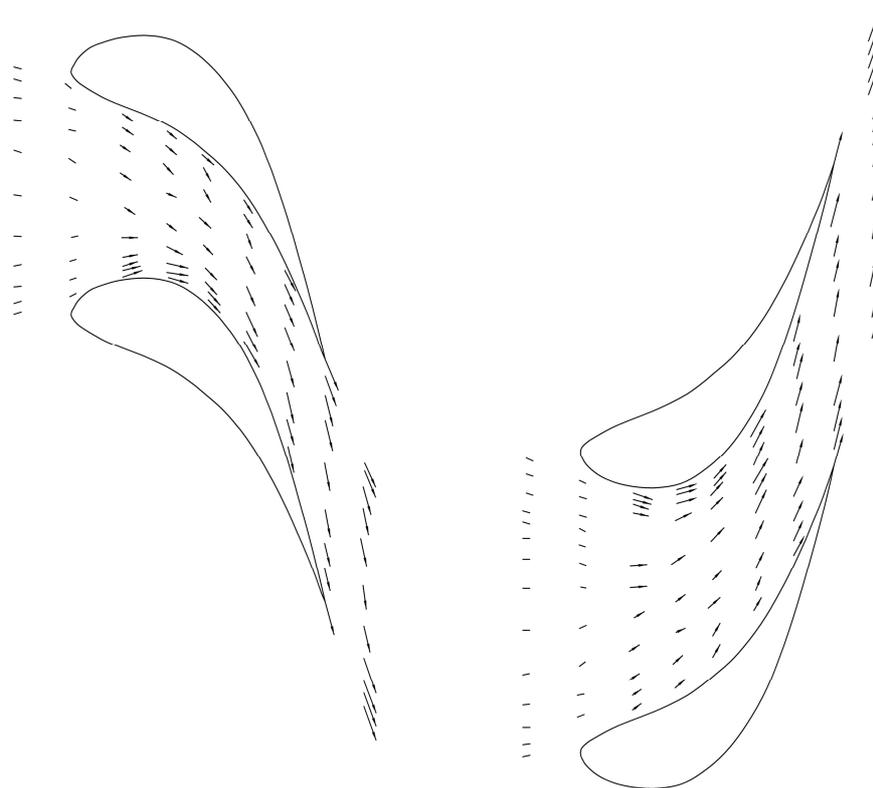


Рисунок 9 – Поля векторов скорости потока в корневом (а) и периферийном (б) сечениях межлопаточного канала НА

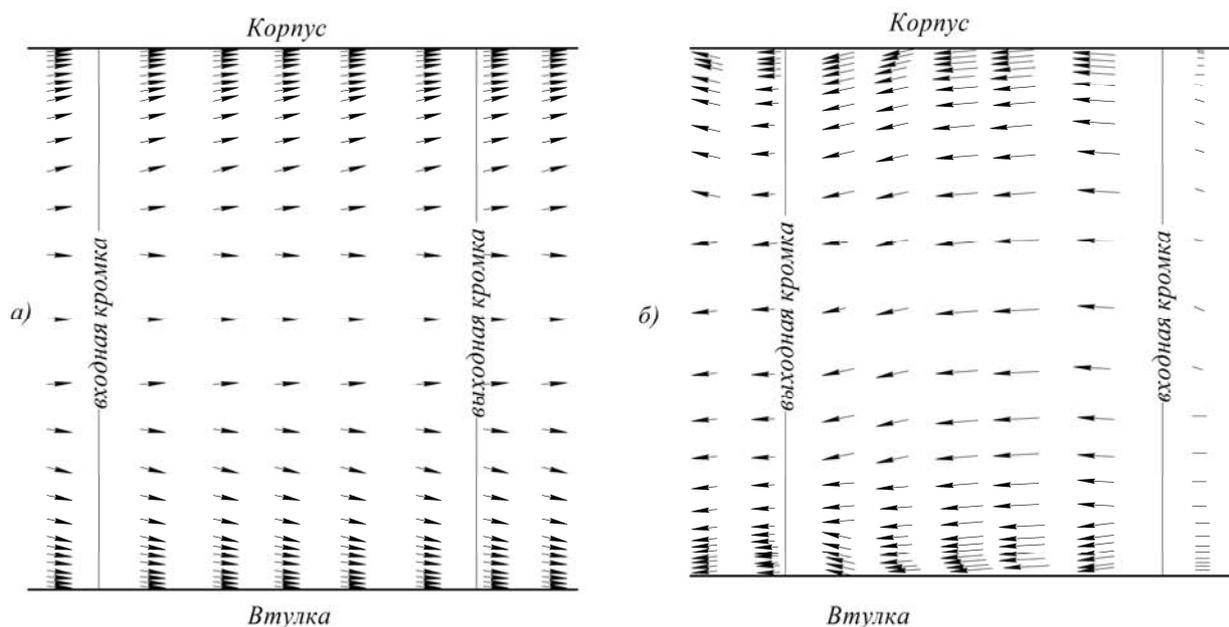


Рисунок 10 – Поля векторов скорости потока у вогнутой (а) и выпуклой (б) поверхностей НЛ

Представленные физические процессы, характерные для НА турбинных ступеней средней верности, формируют интенсивные концевые потери энергии, в значительной степени определяющие экономичность энергоблоков.

Исходя из физической природы возникновения концевых потерь, в таких НА можно предложить следующие пути их снижения:

- совершенствование геометрии и повышение качества изготовления решеток;

- проектирование сопловых каналов, обеспечивающих снижение в пограничных слоях поперечных градиентов давления и объема трансформируемой массы;
- меридиональное профилирование корневых и периферийных обводов НА [3];
- выбор оптимальных значений высоты и хорды сопловых лопаток;
- выполнение на выпуклой поверхности НЛ продольных прикорневых канавок (пазов) (от миделева сечения до выходной кромки) с целью уменьшения в этом сечении степени загромождения проходного сечения вихревым шнуром [3];
- обандаживание корневых сечений решеток, лопатки которых закреплены на внешнем обводе НА [3].

Результаты выполненных исследований позволили получить большой объем материала, вскрывающего структуру потока в проточной части НА турбинных ступеней средней верности. Их использование будет способствовать оптимизации проектных решений при создании и доводке паровых и газовых турбин различной мощности и назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева, Н.Н. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Н.Н. Афанасьева, В.Н. Бусурин, И.Г. Гоголев и др.; под ред. В.А. Черникова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 263с.
2. Гоголев, И.Г. Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин / И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов. – Брянск: Грани, 1995. – 258с.
3. Гоголев, И.Г. Повышение эффективности проточной части турбомашин / И.Г. Гоголев, А.М. Дроконов, А.Д. Николаев // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2009. – С. 43 – 52.
4. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. – М.: Энергия, 1974. – 230 с.
5. Дейч, М.Е. Исследования и расчеты ступеней осевых турбин / М.Е. Дейч, Б.М. Трояновский. – М.: Машиностроение, 1964. – 616 с.
6. Щегляев, А.В. Паровые турбины (теория теплового процесса и конструкции турбин). Учебник для студентов энергомашиностроительных и теплоэнергетических специальностей вузов. Изд. 5-е доп. и подгот. к печати проф. Б.М. Трояновским./ А.В. Щегляев. – М. Энергия, 1976. – 368с.
7. David, O. Seitenwandgrenzschichten und Sekundärströmungseffekte in stark umlenkenden Turbinengittern / O. David, H.E. Gallus. – Abschlußbericht über das Vorhaben. Nr. 223. FVV – Heft R 309, 1982.
8. Lawerenz, M.O. Ein Beitrag zur Berechnung der dreidimensionalen Reibungsbehafteten Strömung durch axiale Turbinenringgitter / M.O. Lawerenz. – Aachen, Technische Hochschule, 1986. – 136 s.

Гоголев Иван Григорьевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ)

Д – р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета (БГТУ)

241035, г. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, д.7.

Тел. 8- (4832)-51-84-80

Николаева Татьяна Алексеевна

Брянский государственный технический университет (БГТУ)

Д – р пед. наук, профессор кафедры БЖД Брянского государственного технического университета (БГТУ)

241035, г. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, д.7.

Тел. 8-(4832)-58-82-34

Дроконов Алексей Михайлович

Брянский государственный технический университет (БГТУ)

Канд. техн. наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета (БГТУ)

241035, г. Брянск, бульвар им. 50-летия Октября, д.7.

тел. 8-(4832)-51-84-80

I.G. GOGOLEV, T.A. NIKOLAEVA, A.M. DROKONOV

THE RESEARCH OF FLOW STRUCTURE IN THE CANAL GUIDE APPARATUS OF THE AXIAL TURBIN MIDDLE-FAN STAGE

Researches of structure of a stream in channels of directing devices of axial turbine steps of average fanning are executed, recommendations about decrease in influence of secondary currents on their profitability are stated.

Key words: *the turbine step, directing the device, stream structure, an interface, a vortical current, energy losses, a stream separation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Afanas'eva, N.N. Ajerodinamicheskie harakteristiki stupenej teplovyh turbin / N.N. Afanas'eva, V.N. Busurin, I.G. Gogolev i dr.; pod red. V.A. Chernikova. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1980. – 263s.
2. Gogolev, I.G. Ajerodinamicheskie harakteristiki stupenej i patrubkov teplovyh turbin / I.G. Gogo-lev, A.M. Drokonov. – Brjansk: Grani, 1995. – 258s.
3. Gogolev, I.G. Povyszenie jeffektivnosti protochnoj chasti turbomashin / I.G. Gogolev, A.M. Droko-nov, A.D. Nikolaev // Sovershenstvovanie jenergeticheskikh mashin: sb. nauch. tr. – Brjansk: BGTU, 2009. – S. 43 – 52.
4. Dejch, M.E. Tehnicheskaja gazodinamika / M.E. Dejch. – M.: Jenergija, 1974. – 230 s.
5. Dejch, M.E. Issledovaniya i raschety stupenej osevyh turbin / M.E. Dejch, B.M. Trojanovskij. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 616 s.
6. Wegljaev, A.V. Parovye turbiny (teoriya teplovogo processa i konstrukcii turbin). Uchebnik dlja studentov jenergomashinostroitel'nyh i teplojenergeticheskikh special'nostej vuzov. Izd. 5-e dop. i podgot. k pečati prof. B.M. Trojanovskim./ A.V. Wegljaev. – M. Jenergija, 1976. – 368s.
7. David, O. Seitenwandgrenzschichten und Sekundärströmungseffekte in stark umlenkenden Turbinengittern / O. David, H.E. Gallus. – Abschlußbericht uber das Vorhaben. Nr. 223. FVV – Heft R 309, 1982.
8. Lawerenz, M.O. Ein Beitrag zur Berechnung der dreidimensionalen Reibungsbehaftenen Strömung durch axiale Turbinenringgitter / M.O. Lawerenz. – Aachen, Technische Hochschule, 1986. – 136 s.

Gogolev Ivan Grigoryevich

Bryansk state technical university (BGTU)

Doctor of technical science, professor of department “Heat engines” of Bryansk state technical university (BGTU)

241035, bulvar im.50-letiya Oktyabrja, 7, Bryansk

Tel. 8-4832-51-84-80

Nickolaeva Tatyana Alekseevna

Bryansk state university (BGU)

Doctor of pedagogical science, professor of department “Health and Safety” of Bryansk state university (BGU)

241035, bulvar im.50-letiya Oktyabrja, 7, Bryansk

Tel. 8-4832-58-82-34

Drokonov Aleksey Michailovich

Bryansk state technical university (BGTU)

Candidate of technical science, professor of department “Heat engines” of Bryansk state technical university (BGTU)

241035, bulvar im.50-letiya Oktyabrja, 7, Bryansk

Tel. 8-4832-51-84-80

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКОГО ВИТКА С ТОКОМ В ОДНОРОДНОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Предложен метод представления осевой компоненты магнитной индукции плоского витка с током, состоящего из двух дуговых и двух радиальных участков, расположенного в однородной изотропной среде, в форме совокупности гармонических составляющих.

Ключевые слова: плоский виток с током, магнитное поле, магнитная индукция, гармонические составляющие, однородная изотропная среда.

В работе [1] изложен анализ магнитного поля, порождаемого плоским витком с током (рис. 1), являющимся элементом обмотки статора торцевой электрической машины.

Получены выражения компонент векторного потенциала и магнитной индукции, представленные в замкнутой аналитической форме. Для удобства читателей воспроизведем их.

Для дуговых участков DA и BC (рис.1) выражения радиальной и тангенциальной составляющих векторного потенциала имеют вид:

$$A_{\rho}^{DA} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi} \sqrt{\frac{R_2}{\rho}} \cdot k_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin 2\theta}{\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad (1)$$

$$A_{\alpha}^{DA} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \sqrt{\frac{R_2}{\rho}} \cdot k_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos 2\theta}{\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad (2)$$

$$A_{\rho}^{BC} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \sqrt{\frac{R_1}{\rho}} \cdot k_1 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin 2\theta}{\sqrt{1 - k_1^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad (3)$$

$$A_{\alpha}^{BC} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi} \sqrt{\frac{R_1}{\rho}} \cdot k_1 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos 2\theta}{\sqrt{1 - k_1^2 \sin^2 \theta}} d\theta, \quad (4)$$

где

$$k_2^2 = \frac{4R_2\rho}{z^2 + (\rho + R_2)^2}, \quad k_1^2 = \frac{4R_1\rho}{z^2 + (\rho + R_1)^2}, \quad (5)$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha + 0,5\alpha_{\tau}}{2}, \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha - 0,5\alpha_{\tau}}{2}, \quad (6)$$

μ - магнитная проницаемость среды, в которой размещен виток;

i - ток контура;

ρ, α, z - цилиндрические координаты точки M пространства.

На рисунке 1 показана проекция M' точки $M(\rho, \alpha, z)$, в которой определяется магнитная индукция, на плоскость витка. Координата α отсчитывается от плоскости симметрии Π , а координата z - от плоскости витка к наблюдателю.

Для радиальных участков AB и CD получены выражения:

$$A_{\rho}^{AB} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi} J_{AB} \cos 2\theta_2, \quad (7)$$

$$A_{\alpha}^{AB} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi} J_{AB} \sin 2\theta_2, \quad (8)$$

$$A_{\rho}^{CD} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} J_{CD} \cos 2\theta_1, \quad (9)$$

$$A_{\alpha}^{CD} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} J_{CD} \sin 2\theta_1, \quad (10)$$

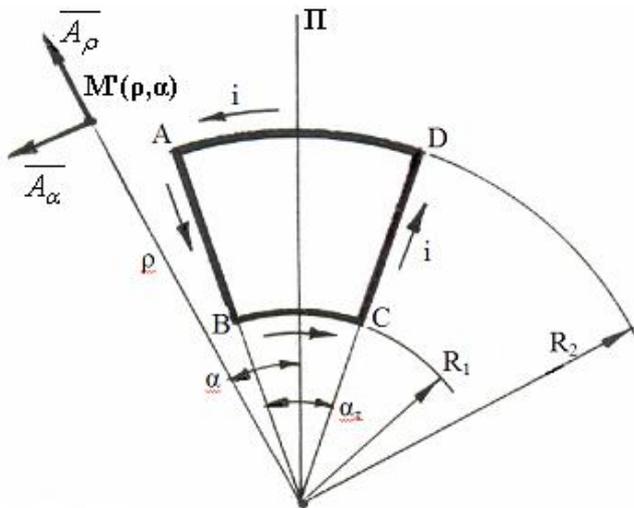


Рисунок 1 – Геометрия плоского токонесущего контура

где

$$J_{AB} = \int_0^{R_2-R_1} \frac{dx}{\sqrt{z^2 + \rho^2 + (R_2 - x)^2 + 2(R_2 - x)\rho \cos 2\theta_2}}, \quad (11)$$

$$J_{CB} = \int_0^{R_2-R_1} \frac{dx}{\sqrt{z^2 + \rho^2 + (R_1 + x)^2 + 2(R_1 + x)\rho \cos 2\theta_1}}. \quad (12)$$

Поскольку виток плоский, осевая составляющая $\overline{A_z}$ векторного потенциала \overline{A} отсутствует, а для вектора магнитной индукции справедлива формула [1]:

$$\overline{B} = -\frac{\partial A_\alpha}{\partial z} \overline{e_\rho} + \frac{\partial A_\rho}{\partial z} \overline{e_\alpha} + \left(\frac{A_\alpha}{\rho} + \frac{\partial A_\alpha}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial A_\rho}{\partial \alpha} \right) \overline{e_z}, \quad (13)$$

где $\overline{e_\rho}, \overline{e_\alpha}, \overline{e_z}$ – орты цилиндрической системы координат.

Формулу (13), руководствуясь принципом суперпозиции, будем применять для каждого из участков контура.

В дальнейшем ограничимся определением осевой компоненты B_z магнитной индукции, которая имеет особое значение в связи с анализом магнитного поля в кольцевом зазоре между магнитопроводами статора и ротора торцовой электрической машины:

$$B_z = \frac{A_\alpha}{\rho} + \frac{\partial A_\alpha}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial A_\rho}{\partial \alpha}. \quad (14)$$

Для участка DA в соответствии с (14), имея в виду (1), (2), (5), (6), получим:

$$\begin{aligned} B_z^{DA} = & -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \sqrt{\frac{R_2}{\rho}} \cdot k_2 \left\{ \left[1 - \frac{k_2^2}{2} \left(1 + \frac{\rho}{R_2} \right) \right] \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos 2\theta}{\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2 \theta}} d\theta + \right. \\ & + \frac{k_2^2}{2} \left[1 - \frac{k_2^2}{2} \left(1 + \frac{\rho}{R_2} \right) \right] \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\sin^2 \theta \cos 2\theta}{\left(\sqrt{1 - k_2^2 \sin^2 \theta} \right)^3} d\theta + \\ & \left. + \frac{1}{2} \left[\frac{\sin \varphi_1}{\sqrt{1 - k_2^2 \cos^2 \frac{\varphi_1}{2}}} - \frac{\sin \varphi_2}{\sqrt{1 - k_2^2 \cos^2 \frac{\varphi_2}{2}}} \right] \right\}, \quad (15) \end{aligned}$$

где

$$\varphi_1 = \alpha + 0,5\alpha_\tau; \quad \varphi_2 = \alpha - 0,5\alpha_\tau. \quad (16)$$

Введем обозначения:

$$2\theta = \pi - \varphi; \quad (17)$$

$$v_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + \rho^2 + z^2}}; \quad \eta_2 = \frac{\rho}{\sqrt{R_2^2 + \rho^2 + z^2}}; \quad \varepsilon_2 = 2v_2\eta_2. \quad (18)$$

При этом из (17) с учетом (16) имеем (6).

Кроме того, справедлива зависимость:

$$k_2^2 = \frac{2\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2}. \quad (19)$$

Учитывая принятые обозначения, преобразуем (15) к следующему виду:

$$\begin{aligned} B_z^{DA} = & -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} v_2 \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{(1 - \eta_2^2) \cos \varphi}{\left(\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi} \right)^3} d\varphi - \frac{\varepsilon_2}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\cos^2 \varphi}{\left(\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi} \right)^3} d\varphi + \right. \\ & \left. + \frac{\sin \varphi_1}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi_1}} - \frac{\sin \varphi_2}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi_2}} \right] \quad (20) \end{aligned}$$

Интегралы, входящие в (20), не берутся в элементарных функциях. Можно показать, что они сводятся к эллиптическим интегралам первого и второго рода [2].

В настоящей работе, в отличие от [1], представление компоненты B_z дается в форме совокупности гармонических составляющих, что представляет значительный интерес для решения некоторых задач электродинамики при проектировании торцовых асинхронных электродвигателей.

В этой связи, разложив подынтегральные выражения в ряды, получим:

$$B_z^{DA} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} v_2 \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n^{(2)} \cos^n \varphi d\varphi + \frac{\sin \varphi_1}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi_1}} - \frac{\sin \varphi_2}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi_2}} \right], \quad (21)$$

где

$$\beta_n^{(2)} = C_{n-1} \varepsilon_2^{n-1} k_n^{(2)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (22)$$

При этом

$$k_n^{(2)} = n - (2n - 1)\eta_2^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad (23)$$

$$C_0 = 1; C_1 = \frac{1}{2}; C_2 = \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}; C_3 = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}; \dots; C_n = \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n - 1)}{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot 2n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

Верхний индекс в $\beta_n^{(2)}$ и $k_n^{(2)}$ указывает на принадлежность этих параметров к участку DA .

Интегралы от степеней $\cos \varphi$, входящие в (21), выражаются следующим образом [3]:

$$\left. \begin{aligned} \int \cos^{2m} x dx &= \frac{1}{2^{2m}} C_{2m}^m \cdot x + \frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} C_{2m}^k \frac{\sin 2(m-k)x}{2(m-k)}, \\ \int \cos^{2m+1} x dx &= \frac{1}{2^{2m}} \sum_{k=0}^m C_{2m+1}^k \frac{\sin(2m-2k+1)x}{2m-2k+1}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где C_{2m}^k, C_{2m+1}^k – биномиальные коэффициенты:

$$C_{2m}^m = \frac{(2m)!}{m!m!}; C_{2m}^k = \frac{(2m)!}{(2m-k)!k!}; C_{2m+1}^k = \frac{(2m+1)!}{(2m+1-k)!k!}.$$

Выражение (21) с учетом (25) представим в виде:

$$B_z^{DA} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} v_2 \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{2m}^{(2)} \left[\frac{C_{2m}^m}{2^{2m}} (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{C_{2m}^k}{2m-2k} (\sin 2(m-k)\varphi_2 - \sin 2(m-k)\varphi_1) \right] + \sum_{m=0}^{\infty} \beta_{2m+1}^{(2)} \left[\frac{1}{2^{2m}} \sum_{k=0}^m \frac{C_{2m+1}^k}{2m-2k+1} (\sin(2m-2k+1)\varphi_2 - \sin(2m-2k+1)\varphi_1) \right] - \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi}} \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} \right\}.$$

Отсюда, учитывая (16), получим:

$$B_z^{DA} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} v_2 \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{2m}^{(2)} \left[\frac{C_{2m}^m}{2^{2m}} \alpha_\tau + \frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{C_{2m}^k}{m-k} \sin(m-k)\alpha_\tau \cdot \cos 2(m-k)\alpha \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{2m+1}^{(2)} \left[\frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^m \frac{C_{2m+1}^k}{2m-2k+1} \sin(2m-2k+1)\alpha_\tau \cos(2m-2k+1)\alpha \right] + \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi}} \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} \right\}. \quad (26)$$

Последнее слагаемое представим в виде ряда:

$$\frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi}} \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} = \sin \varphi \left(1 + c_1 \varepsilon_2 \cos \varphi + c_2 \varepsilon_2^2 \cos^2 \varphi + c_3 \varepsilon_2^3 \cos^3 \varphi + \dots + c_n \varepsilon_2^n \cos^n \varphi + \dots \right) \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2}, \quad (27)$$

где $C_n (n=1, 2, 3, \dots)$ определены в (24).

Выражение (27) содержит разности тригонометрических функций следующего вида:

$$\sin \varphi_2 \cdot \cos^n \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \cos^n \varphi_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (28)$$

Эти разности преобразуем, имея в виду формулы [3]:

$$\cos^{2m} x = \frac{1}{2^{2m}} C_{2m}^m + \frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} C_{2m}^k \cos 2(m-k)x,$$

$$\cos^{2m+1} x = \frac{1}{2^{2m}} \sum_{k=0}^m C_{2m+1}^k \cos(2m-2k+1)x.$$

Тогда с учетом (16) получим:

$$\begin{aligned} \sin \varphi \cdot \cos^{2m} \varphi \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} &= -\frac{C_{2m}^m}{2^{2m-1}} \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha + \frac{1}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} C_{2m}^k \left[\sin(2m-2k-1) \frac{\alpha_\tau}{2} \times \right. \\ &\times \cos(2m-2k-1)\alpha - \left. \sin(2m-2k+1) \frac{\alpha_\tau}{2} \cdot \cos(2m-2k+1)\alpha \right], \quad (m=1, 2, 3, \dots); \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \sin \varphi \cdot \cos^{2m+1} \varphi \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} &= \frac{1}{2^{2m}} \sum_{k=0}^m C_{2m+1}^k \left[\sin(m-k)\alpha_\tau \cdot \cos 2(m-k)\alpha - \right. \\ &\left. - \sin(m-k+1)\alpha_\tau \cdot \cos 2(m-k+1)\alpha \right], \quad (m=0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (30)$$

Выражение (27) при учете (29) и (30) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - \varepsilon_2 \cos \varphi}} \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} &= -2 \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{C_{2m} \varepsilon_2^{2m}}{2^{2m-1}} \left(-C_{2m}^m \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha + F_{2m}(\alpha_\tau, \alpha) \right) + \\ &+ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_{2m+1} \varepsilon_2^{2m+1}}{2^{2m}} F_{2m+1}(\alpha_\tau, \alpha), \end{aligned} \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned} F_{2m}(\alpha_\tau, \alpha) &= \sum_{k=0}^{m-1} C_{2m}^k \left[\sin(2m-2k-1) \frac{\alpha_\tau}{2} \cos(2m-2k-1)\alpha - \right. \\ &\left. - \sin(2m-2k+1) \frac{\alpha_\tau}{2} \cos(2m-2k+1)\alpha \right], \quad (m=1, 2, 3, \dots); \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} F_{2m+1}(\alpha_\tau, \alpha) &= \sum_{k=0}^m C_{2m+1}^k \left[\sin(m-k)\alpha_\tau \cos 2(m-k)\alpha - \right. \\ &\left. - \sin(m-k+1)\alpha_\tau \cos 2(m-k+1)\alpha \right], \quad (m=0, 1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (33)$$

В результате подстановки (31) в (26) с учетом того, что согласно (22)

$$\beta_{2m}^{(2)} = C_{2m-1} \varepsilon_2^{2m-1} k_{2m}^{(2)}; \quad \beta_{2m+1}^{(2)} = C_{2m} \varepsilon_2^{2m} k_{2m+1}^{(2)}, \quad (34)$$

находим:

$$\begin{aligned} B_z^{DA} &= \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} v_2 \left\{ -2 \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\beta_{2m}^{(2)} \left(\frac{C_{2m}^m}{2^{2m}} \alpha_\tau + \frac{1}{2^{2m-1}} \cdot \Phi_{2m}(\alpha_\tau, \alpha) \right) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{C_{2m} \varepsilon_2^{2m}}{2^{2m-1}} \left(-C_{2m}^m \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha + F_{2m}(\alpha_\tau, \alpha) \right) \right] + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\beta_{2m+1}^{(2)} \cdot \frac{1}{2^{2m-1}} \cdot \Phi_{2m+1}(\alpha_\tau, \alpha) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{C_{2m+1} \varepsilon_2^{2m+1}}{2^{2m}} \cdot F_{2m+1}(\alpha_\tau, \alpha) \right\}, \quad (35)$$

где

$$\Phi_{2m}(\alpha_\tau, \alpha) = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{C_{2m}^k}{m-k} \sin(m-k)\alpha_\tau \cdot \cos 2(m-k)\alpha, \quad (m=1,2,3,\dots); \quad (36)$$

$$\Phi_{2m+1}(\alpha_\tau, \alpha) = \sum_{k=0}^m \frac{C_{2m+1}^k}{2m-2k+1} \sin(2m-2k+1)\frac{\alpha_\tau}{2} \cos(2m-2k+1)\alpha, \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (37)$$

В развернутой форме выражение (35) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} B_z^{DA} = & \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot v_2 \left\{ \alpha_\tau \left(\frac{C_1^0}{2} \beta_2^{(2)} + \frac{C_3^1}{2^3} \beta_4^{(2)} + \frac{C_5^2}{2^5} \beta_6^{(2)} + \frac{C_7^3}{2^7} \beta_8^{(2)} + \frac{C_9^4}{2^9} \beta_{10}^{(2)} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{C_{11}^5}{2^{11}} \beta_{12}^{(2)} + \dots \right) + \cos \alpha \cdot \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \left[-2\eta_2^2 + \frac{C_3^1}{2} C_2 \varepsilon_2^2 \left(k_3^{(2)} - \frac{1}{3} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_5^2}{2^3} C_4 \varepsilon_2^4 \left(k_5^{(2)} - \frac{1}{5} \right) + \frac{C_7^3}{2^5} C_6 \varepsilon_2^6 \left(k_7^{(2)} - \frac{1}{7} \right) + \frac{C_9^4}{2^7} C_8 \varepsilon_2^8 \left(k_9^{(2)} - \frac{1}{9} \right) + \dots \right] + \\ & + \cos 2\alpha \cdot \sin \alpha_\tau \cdot \frac{1}{2} \left[C_1 \varepsilon_2 \left(k_2^{(2)} - 2 \right) + \frac{C_4^1}{2^2} C_3 \varepsilon_2^3 \left(k_4^{(2)} - \frac{2}{2} \right) + \frac{C_6^2}{2^4} C_5 \varepsilon_2^5 \left(k_6^{(2)} - \frac{2}{3} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_8^3}{2^6} C_7 \varepsilon_2^7 \left(k_8^{(2)} - \frac{2}{4} \right) + \dots \right] + \cos 3\alpha \cdot \sin \frac{3}{2} \alpha_\tau \cdot \frac{1}{3} \left[\frac{C_3^0}{2} C_2 \varepsilon_2^2 \left(k_3^{(2)} - 3 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_5^1}{2^3} C_4 \varepsilon_2^4 \left(k_5^{(2)} - \frac{9}{5} \right) + \frac{C_7^2}{2^5} C_6 \varepsilon_2^6 \left(k_7^{(2)} - \frac{9}{7} \right) + \frac{C_9^3}{2^7} C_8 \varepsilon_2^8 \left(k_9^{(2)} - \frac{9}{2} \right) + \dots \right] + \\ & + \cos 4\alpha \cdot \sin 2\alpha_\tau \cdot \frac{1}{4} \left[\frac{C_4^0}{2^2} C_3 \varepsilon_2^3 \left(k_4^{(2)} - 4 \right) + \frac{C_6^1}{2^4} C_5 \varepsilon_2^5 \left(k_6^{(2)} - \frac{8}{3} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_8^2}{2^6} C_7 \varepsilon_2^7 \left(k_8^{(2)} - \frac{8}{4} \right) + \frac{C_{10}^3}{2^8} C_9 \varepsilon_2^9 \left(k_{10}^{(2)} - \frac{8}{5} \right) + \dots \right] + \\ & + \cos 5\alpha \cdot \sin \frac{5}{2} \alpha_\tau \cdot \frac{1}{5} \left[\frac{C_5^0}{2^3} C_4 \varepsilon_2^4 \left(k_5^{(2)} - 5 \right) + \frac{C_7^1}{2^5} C_6 \varepsilon_2^6 \left(k_7^{(2)} - \frac{25}{7} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_9^2}{2^7} C_8 \varepsilon_2^8 \left(k_9^{(2)} - \frac{25}{9} \right) + \frac{C_{11}^3}{2^9} C_{10} \varepsilon_2^{10} \left(k_{11}^{(2)} - \frac{25}{11} \right) + \dots \right] + \dots \left. \right\}. \quad (38) \end{aligned}$$

Закономерность построения рядов, входящих в (38), очевидна. При необходимости они могут быть легко продолжены. Заметим, что аналитическое выражение для компоненты B_z^{BC} имеет структуру, аналогичную B_z^{DA} . При этом в формулах (18), (22), (23) следует лишь заменить индекс «2» на «1», то есть будем иметь:

$$v_1 = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + \rho^2 + z^2}}; \quad \eta_1 = \frac{\rho}{\sqrt{R_1^2 + \rho^2 + z^2}}; \quad \varepsilon_1 = 2v_1\eta_1. \quad (39)$$

Тогда

$$\beta_n^{(1)} = C_{n-1} \varepsilon_1^{n-1} k_n^{(1)}; \quad k_n^{(1)} = n - (2n-1)\eta_1^2. \quad (40)$$

Причем, правая часть в выражении для B_z^{BC} , аналогичном (35), должна быть взята со знаком минус, с учетом направления стрелки тока i (рис. 1).

Рассмотрим определение компоненты B_z для прямолинейных участков AB и CD (рис. 1).

Введя обозначение

$$\zeta = (R_2 - x)/R_2 \quad (41)$$

и выполнив элементарные преобразования, интеграл (11) приводим к виду:

$$J_{AB} = v_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{d\zeta}{\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \zeta \varepsilon_2 \cos \varphi_2}}, \quad (42)$$

где

$$\zeta_1 = R_1/R_2, \quad (43)$$

а параметры $v_2, \varepsilon_2, \varphi_2$ определены согласно (18) и (16).

Интеграл (12), приняв

$$\zeta = (R_1 + x)/R_2, \quad (44)$$

приводим к аналогичному виду:

$$J_{CD} = v_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{d\zeta}{\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \zeta \varepsilon_2 \cos \varphi_1}}, \quad (45)$$

где φ_1 определен в (16).

Для определения компонент B_z^{AB} и B_z^{CD} воспользуемся формулой (14), предварительно определив производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{AB}}{\partial \rho} &= -\frac{v_2 \eta_2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\eta_2 - v_2 \zeta \cos \varphi_2}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2}\right)^3} d\zeta \\ \frac{\partial J_{CD}}{\partial \rho} &= -\frac{v_2 \eta_2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\eta_2 - v_2 \zeta \cos \varphi_1}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1}\right)^3} d\zeta ; \\ \frac{\partial A_\alpha^{AB}}{\partial \rho} &= -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot \frac{v_2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\left(\eta_2^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2\right) \sin \varphi_2}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2}\right)^3} d\zeta ; \\ \frac{\partial A_\alpha^{CD}}{\partial \rho} &= \frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot \frac{v_2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\left(\eta_2^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1\right) \sin \varphi_1}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1}\right)^3} d\zeta ; \\ \frac{\partial A_\rho^{AB}}{\partial \alpha} &= \frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot v_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{\sin \varphi_2 \left(1-v_2^2(1-\zeta^2) - \frac{1}{2} \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2\right)}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2}\right)^3} d\zeta ; \\ \frac{\partial A_\rho^{CD}}{\partial \alpha} &= -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot v_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{\sin \varphi_1 \left(1-v_2^2(1-\zeta^2) - \frac{1}{2} \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1\right)}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1}\right)^3} d\zeta . \end{aligned}$$

Тогда согласно (14) получим:

$$B_z^{AB} = -\frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot \frac{v_2 \eta_2^2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\sin \varphi_2}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_2}\right)^3} d\zeta ; \quad (46)$$

$$B_z^{CD} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi} \cdot \frac{v_2 \eta_2^2}{\rho} \int_{\zeta_1}^1 \frac{\sin \varphi_1}{\left(\sqrt{1-v_2^2(1-\zeta^2) - \varepsilon_2 \zeta \cos \varphi_1}\right)^3} d\zeta . \quad (47)$$

Интегралы (46) и (47) берутся в элементарных функциях. Однако, имея в виду их представление в форме совокупности гармонических составляющих, выполним следующие преобразования (на примере B_z^{AB}):

$$\begin{aligned}
 B_z^{AB} &= -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\eta_2^2}{v_2^2} \sin \varphi_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{d\zeta}{\left(\sqrt{\zeta^2 + a^2}\right)^3 \left(\sqrt{1 - \frac{\zeta \varepsilon_2 \cos \varphi_2}{v_2^2 (\zeta^2 + a^2)}}\right)^3} = \\
 &= -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\eta_2^2}{v_2^2} \sin \varphi_2 \int_{\zeta_1}^1 \frac{1}{\left(\sqrt{\zeta^2 + a^2}\right)^3} \left(1 + 3C_1 \delta_2 \cos \varphi_2 + 5C_2 \delta_2^2 \cos^2 \varphi_2 + \right. \\
 &+ 7C_3 \delta_2^3 \cos^3 \varphi_2 + 9C_4 \delta_2^4 \cos^4 \varphi_2 + 11C_5 \delta_2^5 \cos^5 \varphi_2 + 13C_6 \delta_2^6 \cos^6 \varphi_2 + \dots + \\
 &\left. + (2n-1)C_{n-1} \delta_2^{n-1} \cos^{n-1} \varphi_2 + \dots\right), \tag{48}
 \end{aligned}$$

где

$$a^2 = (1 - v_2^2) / v_2^2, \tag{49}$$

$$\delta_2 = \frac{\zeta \varepsilon_2}{v_2^2 (\zeta^2 + a^2)}, \tag{50}$$

а C_1, C_2, C_3, \dots определены в (24).

Рассмотрим интегралы, входящие в (48).

$$S_n = \int_{\zeta_1}^1 \frac{\zeta^{n-1}}{\left(\sqrt{\zeta^2 + a^2}\right)^3 (\zeta^2 + a^2)^{n-1}} d\zeta = \int_{\zeta_1}^1 \frac{\zeta^{n-1}}{(\zeta^2 + a^2)^{n+1/2}} d\zeta, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \tag{51}$$

где n – номер члена ряда в (48).

При четных и нечетных значениях n имеем соответственно [3]:

$$S_{2m} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(-1)^{m+k} C_{m-1}^k a^{2m-2k-2}}{(4m-2k-1)(\zeta^2 + a^2)^{2m-k-1/2}} \Bigg|_{\zeta_1}^1, \quad m = 1, 2, \dots, \tag{52}$$

$$S_{2m+1} = a^{-2(m+1)} \sum_{k=0}^m \frac{(-1)^k C_m^k}{2m+2k+1} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2}\right)^{m+k+1/2} \Bigg|_{\zeta_1}^1, \quad m = 0, 1, 2, \dots \tag{53}$$

Выражение (48) с учетом (52) и (53) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 B_z^{AB} &= -\frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\eta_2^2}{v_2^2} \sin \varphi_2 \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \left[(4m-1) C_{2m-1} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2^2}\right)^{2m-1} \cdot S_{2m} \cdot \cos^{2m-1} \varphi_2 + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \sum_{m=0}^{\infty} (4m+1) C_{2m} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2^2}\right)^{2m} \cdot S_{2m+1} \cdot \cos^{2m} \varphi_2 \right] \right\}. \tag{54}
 \end{aligned}$$

Сопоставление (47) и (46) позволяет записать аналогичное выражение для B_z^{CD} :

$$\begin{aligned}
 B_z^{CD} &= \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\eta_2^2}{v_2^2} \sin \varphi_1 \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \left[(4m-1) C_{2m-1} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2^2}\right)^{2m-1} \cdot S_{2m} \cdot \cos^{2m-1} \varphi_1 + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \sum_{m=0}^{\infty} (4m+1) C_{2m} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2^2}\right)^{2m} \cdot S_{2m+1} \cdot \cos^{2m} \varphi_1 \right] \right\}. \tag{55}
 \end{aligned}$$

Сложив (54) и (55), получим:

$$B_z^{AB} + B_z^{CD} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\eta_2^2}{v_2^2} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \left[(4m-1) C_{2m-1} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2^2}\right)^{2m-1} \cdot S_{2m} \cdot (\sin \varphi \cdot \cos^{2m-1} \varphi)_{\varphi_2}^{\varphi_1} + \right. \right.$$

$$+ \sum_{m=0}^{\infty} (4m+1) C_{2m} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^{2m} \cdot S_{2m+1} \cdot \left(\sin \varphi \cdot \cos^{2m} \varphi \right)_{\varphi_2}^{\varphi_1} \left. \right\}. \quad (56)$$

Отсюда, приняв во внимание (29) и (30), а также (32) и (33), находим:

$$B_z^{AB} + B_z^{CD} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\rho^2}{R_2^2} \left\{ S_1 \cdot 2 \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cdot \cos \alpha + \sum_{m=1}^{\infty} \left[(4m+1) C_{2m} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^{2m} \cdot S_{2m+1} \times \right. \right. \\ \times \left(\frac{C_{2m}^m}{2^{2m-1}} \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \cos \alpha - \frac{F_{2m}(\alpha_\tau, \alpha)}{2^{2m-1}} \right) - \\ \left. \left. - (4m-1) C_{2m-1} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^{2m-1} \cdot S_{2m} \cdot \frac{F_{2m-1}(\alpha_\tau, \alpha)}{2^{2m-2}} \right] \right\}. \quad (57)$$

В развернутой форме из (57) имеем:

$$B_z^{AB} + B_z^{CD} = \frac{\mu \cdot i}{4\pi\rho} \cdot \frac{\rho^2}{R_2^2} \left\{ \cos \alpha \cdot \sin \frac{\alpha_\tau}{2} \left[2S_1 + 5C_2 S_3 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^2 \cdot \frac{C_2^1 - C_2^0}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 9C_4 S_5 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^4 \cdot \frac{C_4^2 - C_4^1}{2^3} + 13C_6 S_7 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^6 \cdot \frac{C_6^3 - C_6^2}{2^5} + 17C_8 S_9 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^8 \cdot \frac{C_8^4 - C_8^3}{2^7} + \dots \right] + \right. \\ \left. + \cos 2\alpha \sin \alpha_\tau \left[3C_1 S_2 \frac{\varepsilon_2}{v_2} + 7C_3 S_4 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^3 \cdot \frac{C_3^1 - C_3^0}{2^2} + 11C_5 S_6 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^5 \cdot \frac{C_5^2 - C_5^1}{2^4} + \right. \right. \\ \left. \left. + 15C_7 S_8 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^7 \cdot \frac{C_7^3 - C_7^2}{2^6} + 19C_9 S_{10} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^9 \cdot \frac{C_9^4 - C_9^3}{2^8} + \dots \right] + \right. \\ \left. + \cos 3\alpha \sin \frac{3}{2} \alpha_\tau \left[5C_2 S_3 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} + 9C_4 S_5 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^4 \cdot \frac{C_4^1 - C_4^0}{2^3} + \right. \right. \\ \left. \left. + 13C_6 S_7 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^6 \cdot \frac{C_6^2 - C_6^1}{2^5} + 17C_8 S_9 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^8 \cdot \frac{C_8^3 - C_8^2}{2^7} + \dots \right] + \right. \\ \left. + \cos 4\alpha \sin 2\alpha_\tau \left[7C_3 S_4 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^3 \cdot \frac{1}{2^2} + 11C_5 S_6 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^5 \cdot \frac{C_5^1 - C_5^0}{2^4} + \right. \right. \\ \left. \left. + 15C_7 S_8 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^7 \cdot \frac{C_7^2 - C_7^1}{2^6} + 19C_9 S_{10} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^9 \cdot \frac{C_9^3 - C_9^2}{2^8} + \dots \right] + \right. \\ \left. + \cos 5\alpha \sin \frac{5}{2} \alpha_\tau \left[9C_4 S_5 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^4 \cdot \frac{1}{2^3} + 13C_6 S_7 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^6 \cdot \frac{C_6^1 - C_6^0}{2^5} + \right. \right. \\ \left. \left. + 17C_8 S_9 \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^8 \cdot \frac{C_8^2 - C_8^1}{2^7} + 21C_{10} S_{11} \left(\frac{\varepsilon_2}{v_2} \right)^{10} \cdot \frac{C_{10}^3 - C_{10}^2}{2^9} + \dots \right] + \dots \right\}. \quad (58)$$

При необходимости ряды, входящие в (58), легко могут быть продолжены, так как закономерности их построения достаточно очевидны. Для биномиальных коэффициентов, входящих в (38) и (58), имеются таблицы (см., например, [4]).

Значения параметров S_n ($n=1, 2, 3, \dots$) вычисляются по выражениям (53) и (52), которые в развернутой форме имеют вид:

$$S_1 = \frac{1}{a^2} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{1/2} \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_3 = \frac{1}{a^4} \left[\frac{C_1^0}{3} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{3/2} - \frac{C_1^1}{5} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{5/2} \right] \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_5 = \frac{1}{a^6} \left[\frac{C_2^0}{5} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{5/2} - \frac{C_2^1}{7} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{7/2} + \frac{C_2^2}{9} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{9/2} \right] \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_7 = \frac{1}{a^8} \left[\frac{C_3^0}{7} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{7/2} - \frac{C_3^1}{9} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{9/2} + \frac{C_3^2}{11} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{11/2} - \frac{C_3^3}{13} \left(\frac{\zeta^2}{\zeta^2 + a^2} \right)^{13/2} \right] \Big|_{\zeta_1}^1$$

$$S_2 = - \frac{1}{3(\zeta^2 + a^2)^{3/2}} \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_4 = \left[\frac{C_1^0 a^2}{7(\zeta^2 + a^2)^{7/2}} - \frac{C_1^1 a^0}{5(\zeta^2 + a^2)^{5/2}} \right] \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_6 = \left[\frac{-C_2^0 a^4}{11(\zeta^2 + a^2)^{11/2}} + \frac{C_2^1 a^2}{9(\zeta^2 + a^2)^{9/2}} - \frac{C_2^2 a^0}{7(\zeta^2 + a^2)^{7/2}} \right] \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

$$S_8 = \left[\frac{C_3^0 a^6}{15(\zeta^2 + a^2)^{15/2}} - \frac{C_3^1 a^4}{13(\zeta^2 + a^2)^{13/2}} + \frac{C_3^2 a^2}{11(\zeta^2 + a^2)^{11/2}} - \frac{C_3^3 a^0}{9(\zeta^2 + a^2)^{9/2}} \right] \Big|_{\zeta_1}^1 ;$$

Заметим, что вычисления компонент вектора \vec{B}_z согласно принципу суперпозиции:

$$B_z = B_z^{DA} + B_z^{BC} + B_z^{AB} + B_z^{CD} \quad (59)$$

могут быть выполнены как на основе зависимостей (35) и (57) непосредственно, так и с использованием их представлений в виде совокупности гармонических составляющих (38) и (58), которые получены из (35) и (57) в результате перегруппировки слагаемых, входящих в (35) и (57).

Выбор алгоритма вычислений определяется характером решаемой задачи. Вместе с тем выражения (38) и (58) позволяют оценить вклад каждой гармонической составляющей в совокупный результат, что может представлять определенный практический интерес в связи с проектированием торцовых электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загрядский, В.И. Магнитное поле некругового витка с током в однородной изотропной среде / В.И. Загрядский, Е.Т. Кобяков // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2000. – № 4 – С. 17-22.
2. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Перевод с 6-го немецкого издания под ред. Л.И. Седова. - М.: Наука, 1968. 344 с.

3. Брычков, Ю.А. Таблицы неопределенных интегралов. Справочник / Ю.А. Брычков, О.И. Маричев, А.П. Прудников. – М.: Наука, 1986.-132 с.

4. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. Перевод с английского Н.В. Леви. – М.: Наука, 1977.-228 с.

Загрядцкий Владимир Иванович

ФГОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (8462) 41-98-30

Кобяков Евгений Тихонович

ФГОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Динамика прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. (8462) 41-98-85

V.I. ZAGRYADTSKIY, E.T. KOPYAKOV

**THE HARMONIOUS ANALYSIS OF THE MAGNETIC FIELD OF THE
FLAT COIL WITH THE CURRENT IN THE HOMOGENEOUS ISOTROPIC
ENVIRONMENT**

The method of representation axial components of a magnetic induction of a flat coil with a current, consisting of two arc and two radial sites, located in the homogeneous isotropic environment, in the form of set of harmonious components is offered

Key words: *flat coil with current, magnetic field, magnetic induction, harmonic components, homogeneous environment conditions.*

BIBLIOGRAPHY

1. Zagryadckij, V.I. Magnitnoe pole nekrugovogo vitka s tokom v odnorodnoj izotropnoj srede / V.I. Zagryadckij, E.T. Kobjakov // Izvestija VUZov. Jelektromehanika. – 2000. – № 4 – S. 17-22.

2. Janke E., Jemde F., Ljosh F. Special'nye funkicii. Formuly, grafiki, tablicy / Perevod s 6-go ne-meckogo izdaniya pod red. L.I. Sedova.- M.: Nauka, 1968. 344 s.

3. Brychkov, Ju.A. Tablicy neopredelennyh integralov. Spravochnik / Ju.A. Brychkov, O.I. Marichev, A.P. Prudnikov. – M.: Nauka, 1986.-132 s.

4. Dvajt, G.B. Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly. Perevod s anglijskogo N.V. Le-vi. – M.: Nauka, 1977.-228 s.

Zagryadskiy Vladimir Ivanovich

State University – Education Science Production Complex

Doctor of technical science, professor of department “Electric equipment and energy saving”

302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,

Tel.: 4862-41-98-30

Kobyakov Eugeny Tihonovich

State University – Education Science Production Complex

Candidate of technical science, professor of department “Dynamics and strength of machines”

302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,

Tel.: 4862-41-98-85

В.В. МАЛИНИН

СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛ С МАКРОКОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Настоящая статья посвящена важной проблеме механики разрушения тел с макроконцентраторами напряжений, направленная на учет взаимовлияния структурных локальных напряжений и макронапряжений в высокоградиентных полях на критерии разрушения. Сформулирован двухуровневый структурно-аналитический критерий разрушения.

Ключевые слова: структурно-аналитический критерий, структурно-механический критерий, хрупкое разрушение, макроконцентратор, критерий разрушения, механика разрушения.

Одной из важных задач механики разрушения тел с макроконцентраторами напряжений является учет взаимовлияния структурных локальных напряжений и макронапряжений в высокоградиентных полях на критерии разрушения.

В настоящей статье приведены результаты, посвященные разработке метода построения двухуровневого критерия разрушения материала при макронеоднородном напряженном состоянии. Учет структурно-механического состояния материала основывается на методе магнитной памяти металла [1].

Рассмотрим методику построения двухуровневого критерия разрушения материала при макронеоднородном напряженном состоянии. Представительный объем макромасштабного уровня будем задавать лабораторным базисом huz . В этом базисе идентифицируются тензоры напряжений σ_{ik} , деформаций ε_{ik} и температура T [2-4].

Характеристический объем структурного элемента будем представлять локальным базисом lmn используя, геодезическую систему координат $\{\Omega\}$ [2-4]. В локальных базисах среза и отрыва задаётся диада $n_i l_k$ на плоскости с нормалью n , а направление образования трещин среза единичным ортом l (рис. 1)

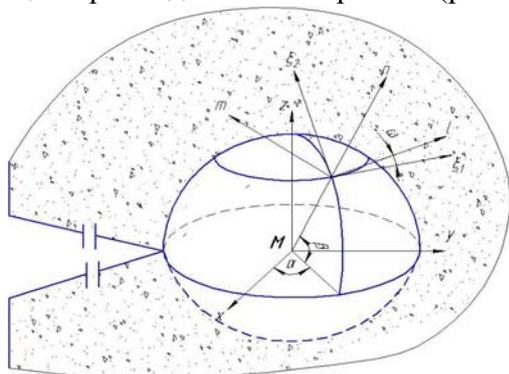


Рисунок 1 – Схема ориентационной системы координат $\{\Omega\}$, используемая для построения модели разрушения

Схема, представленная на рисунке 1 при $r = r_m$, изображает макроточку M , которая находится на расстоянии r_m от острия макроконцентратора и ее окрестности характеризуются структурными элементами в виде локальных точек сферы с радиусом r_m , который считается структурной характеристикой материала, аналог параметра ρ_0 в модели Леонова М.Я. – Русинко К.Н.

При развитии теории прочности в рамках интегрального критерия типа Нейбера-Новожилова целесообразно использовать ориентационное пространство, представленное на рисунке 1 при $r = r_m$. В случае использования градиентного подхода достаточно представления ориентационного пространства $\{\Omega\}$ в виде схемы, представленной на рисунке 1 при $r_m = 1$. Если использовать тензор напряжений Коши, то в виду его симметрии при аналитическом представлении структурных элементов вместо сферы достаточно рассматривать полусферу радиусом $r = r_m$ или $r_m = 1$, что существенно уменьшает время счета при численном моделировании. Отметим, что для случая макронеоднородного чистого растяжения можно задавать структурные элементы на одной четвертой части полусферы. Представленные варианты аналитического отображения структурных элементов относятся к тактическим приемам.

Для случая $r_m = 1$ схемы ориентационной системы координат $\{\Omega\}$, формулы (1) характеризуют матрицу направляющих косинусов α_{ik} , переводящую в локальную систему координат lmn лабораторный базис xyz .

$$\alpha_{ik} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix}; \alpha_{ik} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \cos \omega - & \sin \alpha \sin \omega - & \cos \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \omega \sin \beta & -\cos \alpha \sin \beta \cos \omega & \\ \cos \alpha \cos \omega - & -\cos \alpha \sin \omega - & \sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \alpha \sin \beta \sin \omega & -\sin \alpha \sin \beta \cos \omega & \\ \cos \beta \sin \omega & \cos \beta \cos \omega & \sin \beta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Малый телесный угол $d^3\Omega$ для рассматриваемого ориентационного пространства α, β, ω определяется формулой

$$d^3\Omega = \cos \beta \, d\alpha \, d\beta \, d\omega \quad (2)$$

Отметим, что в лабораторном базисе xyz задаются параметры макромасштабного уровня, в том числе и тензор идеализированных σ_{ik} и эффективных σ_{ik}^* напряжений, а в локальном базисе lmn соответствующие параметры структурных элементов, включая тензор эффективных напряжений τ_{ik}^* . [2-4].

Следуя методике, изложенной в [5] плотность структурных повреждений $\pi(\Omega)$, ориентированных внутри телесного угла $d^3\Omega$ в направлении, заданном для трещин отрыва нормалью $n_i = n_i(\alpha, \beta)$, а для трещин среза диадой $n_i l_k = f(\alpha, \beta, \omega)$, будем характеризовать параметром $\pi(\Omega) d^3\Omega$.

Критерий разрушения в зоне макроконцентратора напряжений, как и при макрооднородном напряженном состоянии должен учитывать необходимые критериальные условия кинетического и силового характера на структурном и макромасштабном уровнях. Однако специфика структурно-механического состояния материала связанного с локализацией макронапряжений в окрестности макроконцентратора требует при построении модели разрушения учесть фактор влияния вида напряженного состояния, степени и характера локализации макронапряжений в зоне концентратора напряжений.

Учитывая вышеизложенные обстоятельства, сформулируем критерий разрушения [5], считая, что разрушение наступит, когда максимальная повреждаемость в соответствующем структурном элементе достигнет критической величины, т.е.

$$\left\{ \begin{aligned} \{ \Pi \} &= \int_{\{\Omega\}} f(\Omega) \delta(\Omega - \Omega_0) \pi(\Omega) d^3\Omega = const \\ \max \pi(\Omega_0) &= 1. \end{aligned} \right. ; \quad (3)$$

Здесь $\delta(\Omega - \Omega_0)$ – дельта функция Дирака; Ω_0 – координаты структурного элемента, в котором повреждаемость $\pi(\Omega)$ достигает максимума.

В качестве аргумента функционала $\pi(\Omega)$ можно использовать эффективное нормальное напряжение $\tau_{nn}^*(\Omega)$, т.е.

$$\pi(\Omega_0) = \tau_{nn}^*(\Omega_0) / \tau_0 = \tau_{33}^*(\Omega) / \tau_0, \quad (4)$$

где τ_0 – критическое напряжение отрыва, равное пределу прочности материала при чистом растяжении (σ_s) стандартного образца. В этом случае критерий (4) для сложного напряженного состояния совпадает по форме с критерием максимальных растягивающих напряжений, однако сформулированного в терминах эффективных напряжений лабораторного базиса xyz , т.е.

$$\max \tau_{nn}^*(\Omega) = \sigma_1^*. \quad (5)$$

Отметим, что в (5) не учитывается кинетический аспект подготовки структуры материала к макроразрушению.

При таком подходе особое значение приобретает вопрос выбора уравнения для эффективного напряжения τ_{ik}^* . Как уже отмечалось в [5], эффективное напряжение τ_{ik}^* должно учитывать влияние зон структурных концентраторов и их эволюцию под нагрузкой. Данное обстоятельство можно учесть, используя инварианты векторной интенсивности собственного магнитного поля рассеивания S_i , измеренного непосредственно в окрестности макроконцентратора.

Другим важным аспектом является необходимость учета влияния вида напряженного состояния, характера и степени неоднородности напряженного состояния в зоне концентратора напряжений на структурно-механические свойства материала. Указанные обстоятельства можно отразить в критерии разрушения, используя достижения, полученные при разработке градиентных методов [6,7].

Критический анализ основных результатов, полученных в градиентном подходе, учет структурно-механических параметров метода магнитной памяти металлов и методов структурно-аналитической мезомеханики [1-3,5] позволили сформулировать следующее уравнение для эффективных напряжений τ_{ik}^* , действующих в структурных элементах испытывающих вскрытие трещин отрыва и трещин среза:

$$\tau_{ik}^*(\Omega) = \delta_{i3} \delta_{k3} \tau_{33}^*(\Omega) + (\delta_{i1} \delta_{k3} + \delta_{i3} \delta_{k1}) \tau_{31}^*(\Omega). \quad (6)$$

с учетом критерия типа (3)

$$\max \tau_{33}^*(\Omega_0) = \sigma_1^*; \quad (7)$$

$$\max \tau_{31}^*(\Omega_0) = \tau_{\max}^*. \quad (8)$$

Для эффективных напряжений $\tau_{ik}^*(\Omega)$ сформулируем в рамках критерия (3) уравнения для σ_1^* и τ_{\max}^* .

При неоднородном напряженном состоянии в зоне концентрации напряжений для формулировки критерия хрупкого разрушения отрывом на макромасштабном уровне, используя принцип эквивалентности [5] будем сравнивать с пределом прочности материала σ_e максимальное значение эффективного напряжения σ_1^* , которое меньше максимального значения первого главного напряжения σ_1 (принятого в качестве эквивалентного в критерии нормального отрыва). Учитывая положительный опыт построения эффективного напряжения, с учетом достижений полученных в градиентном подходе [6,7] сформулировано следующее уравнение для расчета σ_1^* :

$$\sigma_1^* = \sigma_1 / \left(1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_1q_2} \right), \quad \beta = \frac{L}{d}, \quad (9)$$

$$q_1 = S_i^{\max} / S_i^{cp}; \quad (10)$$

$$q_2 = (\text{grad} \sigma_1 \cdot \text{Sign grad} \sigma_1) / \sigma_1, \quad (11)$$

где q_2 – относительный градиент первого главного напряжения, находится из упругого решения соответствующей краевой задачи;

q_1 – относительный инвариант векторной интенсивности S_i собственного магнитного поля рассеивания, характеризует на структурном уровне деформационную способность металла на стадии упрочнения;

L – параметр, имеет размерность длины и характеризует эффективный размер структурных концентраторов напряжений [6]; обозначения *max* и *cp* в (10) указывает на максимальное и среднее значение S_i 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 на основе принципа эквивалентности будем сравнивать с пределом прочности на срез τ_s максимальное значение эф-

эффективного напряжения τ_{\max}^* , которое меньше максимального касательного напряжения τ_{\max} (принятого в качестве эквивалентного в критерии разрушения срезом):

$$\tau_{\max}^* = \tau_{\max} / \left[1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_1q_3} \right]; \quad (12)$$

$$q_3 = (\text{grad } \tau_{\max} \cdot \text{sign grad } \tau_{\max}) / (\tau_{\max} \cdot \text{sign } \tau_{\max}), \quad (13)$$

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 структурном (микро- и мезомасштабном) уровнях [2-5].

Рассмотрим вначале случай разрушения детали с макроконцентратором по механизму отрыва. Будем считать, что разрушение отрывом в окрестности, рассматриваемой локальной макроточки произойдет когда выполняются два условия: достижение эффективных напряжений σ_1^* предела прочности σ_B и обязательное выполнение критерия разрушения на структурном уровне, т.е. при достижении параметром q_1 значения q_{np} . Последнее означает, согласно [1,5], возникновение в данном структурном элементе критической дефектной структуры, характеризуемой предельным состоянием зон структурных концентраторов. Тогда, принимая во внимание условие, при котором первоначальное распространение макротрещины будет происходить по площадке действия максимального нормального напряжения $\max \tau_{nn}$, т.е. первого главного напряжения и наступит только при выполнении двух названных условий, сформулируем окончательный макроскопический критерий разрушения отрывом Π_0^M в виде:

$$\Pi_0^M = X(\sigma_1^* - \sigma_B) X(q_1 - q_{np}) = 1, \quad (14)$$

где $X(x)$ – функция Хевисайда.

Заметим, что в общем случае максимальные значения эффективного напряжения σ_1^* и структурного параметра q_1 могут достигать в точке, не совпадающей с точкой максимального значения первого главного напряжения. Поэтому при расчете на прочность с использованием критерия (14) необходимо проверять данный критерий (14) не только в вершине концентратора, но и других точках тела. В соответствии с соотношением (14), если $\Pi_0^M = 1$, то тело разрушится, если $\Pi_0^M = 0$, то оно не разрушится. Таким образом, макроскопическое разрушение тела с макроконцентраторами напряжений произойдет тогда, когда критического уровня достигнут и эффективные напряжения σ_1^* (в этом случае отражается силовой характер разрушения) и параметр q_1 , что характеризует кинетическую природу разрушения. Отметим, что параметр q_{np} , определяемый методом магнитной памяти металла, является константой материала и характеризует степень структурной неоднородности и предельную деформационную способность металла в зонах структурных концентраторов напряжений [1].

Пусть теперь в окрестности макроконцентратора напряженно-деформированное и структурно-кинетическое состояние соответствуют варианту разрушения путем развития трещин поперечного или продольного сдвига. Для формулировки критерия в случае разрушения сдвигом, 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 структурном ($q_1 = q_{np}$), 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:

$$\Pi_C^M = X(\tau_{\max}^* \text{sign } \tau_{\max}^* - \tau_S) X(q_1 - q_{np}) = 1 \quad (15)$$

Отметим, что как и в случае использования критерия разрушения отрывом (14) максимальные значения эффективного напряжения τ_{\max}^* и структурного параметра q_1 в критерии разрушения срезом (15) могут достигнуть в точке, не совпадающей с точкой максимального значения идеализированного касательного напряжения τ_{\max} . Тогда необходимо проверить критерий (15) как в вершине концентратора, так и в других точках тела.

Критерии разрушения (14) и (15), отражающие различные случаи предельного состояния, можно объединить и записать для них обобщенный (структурно-аналитический) критерий разрушения в виде:

$$\Pi_{\Sigma}^M = X(q_1 - q_{np}) [X(\sigma_1^* - \sigma_B) + X(\tau_{\max}^* \text{sign} \tau_{\max}^* - \tau_S)] \geq 1. \quad (16)$$

Приведенный (16) вариант структурно-аналитического критерия разрушения принципиально отличается от существующих критериев разрушения. Основное отличие состоит в том, что структурно-аналитический критерий содержит два необходимых условия для окончательного разрушения, а именно: кинетический критерий разрушения на структурном уровне, т.е. требование достижения параметром q_1 предельного значения q_{np} , что отражает создание критической дефектной структуры и силовой критерий на макромасштабном уровне по механизму отрывом или срезом. Важным моментом при таком подходе является естественное объединение методов механики разрушения и технической диагностики в рамках использования метода магнитной памяти металлов. Характерно, что для описания прочностных свойств материала около макроконцентраторов достаточно ввести два параметра, один из которых имеет размерность длины, а второй – безразмерный. В соотношениях (9) и (14) роль первого параметра играет L , а второго – β . Параметр L по смыслу характеризует представительный размер структурной неоднородности материала. Параметр β отражает соотношение размеров зон структурных концентраторов и характерных размеров макроконцентраторов напряжений. Важным элементом сформулированного критерия (16) является также то, что благодаря введенному принципу эквивалентности в нем используются стандартные прочностные характеристики, а именно предел прочности при одноосном растяжении σ_s , предел прочности на срез τ_c и предел текучести σ_T через которые выражается и структурный параметр q_{np} [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов, А.А. Метод магнитной памяти и приборы контроля: учеб. пособие / А.А. Дубов, Ал.А. Дубова, С.М. Колокольников. – М.: «Тиссо», 2006. – 332с.
2. Лихачев, В.А. Структурно-аналитическая теория прочности / Лихачев В.А., Малинин В.Г. – СПб.: Наука, 1993. – 471с.
3. Малинин, В.Г. Структурно-аналитическая мезомеханика интенсивной пластической деформации с учетом повреждаемости среды / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина // Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости: сб. статей к75-ю летию В.Г. Зубчанинова, // Е.И. Шемякина и Д.Д. Ивлева. // Тверь: ТГТУ, 2007 – С. 186-200.
4. Rusinko A.: (2009) Synthetic theory of irreversible deformation in the context of fundamental bases of plasticity. *Ind. J.Mech.Mater.*, 41: 106-120.
5. Дубов, А.А. Элементы механики разрушения основанные на методах структурно-аналитической мезомеханики и магнитной памяти металла / А.А. Дубов, В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, В.В. Малинин // см. Настоящий сборник.
6. Леган, М.А. К вопросу о начале пластического течения в зоне концентрации напряжений / М.А. Леган // ПМТФ. – 1991. – №3. – С. 147-152.
7. Новопашин, М.Д. Уруголастическое деформирование и предельное состояние элементов конструкций с концентраторами напряжений / Новопашин М.Д., Сукнев С.В., Иванов А.М. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 112с.

Малинин Владимир Владиславович

ФГОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: malinin2008@yandex.ru

V.V. MALININ

STRUCTURAL AND ANALYTICAL CRITERION OF THE FRAGILE DESTRUCTION FOR MATTER WITH MACROCONCENTRATOR TENSION

This article is devoted to the important problem of fracture mechanics of bodies with stress macroconcentrators designed to record the structural interaction of local stresses and macrostresses in high-gradient fields on fracture criteria. Formulated a two-levels structure-analytical failure criterion.

Key words: *structural-analytical criterion, structural and mechanical criterion, brittle fracture, macroconcentrators, fracture criterion, fracture mechanics*

BIBLIOGRAPHY

1. Dubov, A.A. Metod matnitnoj pamjati i pribory kontrolja: uceb. posobie / A.A. Dubov, A.I.A. Dubova, S.M. Kolokol'nikov. – M.: «Tisso», 2006. – 332s.
2. Lihachev, V.A. Strukturno-analiticheskaja teorija prochnosti / Lihachev V.A., Malinin V.G. – SPb.: Nauka, 1993. – 471s.
3. Malinin, V.G. Strukturno-analiticheskaja mezomehanika intensivnoj plasticheskoj deformacii s uchetom povrezhdaemosti sredy / V.G. Malinin, N.A. Malinina // Sovremennye problemy prochnosti, plastichnosti i ustojchivosti: sb. statej k75-ju letiju V.G. Zubchaninova, // E.I. Shemjakina i D.D. Ivleva. // Tver': TGTU, 2007 – S. 186-200.
4. Rusinko A.: (2009) Synthetic theory of irreversible deformation in the context of fundamental bases of plasticity. Ind. J.Mech.Mater., 41: 106-120.
5. Dubov, A.A. Jelementy mehaniki razrushenija osnovannye na metodah strukturno-analiticheskoj mezomehaniki i magnitnoj pamjati metalla / A.A. Dubov, V.G. Malinin, N.A. Malinina, V.V. Malinin // sm. Na-stojawij sbornik.
6. Legan, M.A. K voprosu o nachale plasticheskogo techenija v zone koncentracii naprjazhenij / M.A. Legan // PMTF. – 1991. – №3. – S. 147-152.
7. Novopashin, M.D. Uprugoplasticheskoe deformirovanie i predel'noe sostojanie jelementov konstrukcij s koncentratorami naprjazhenij / Novopashin M.D., Suknev S.V., Ivanov A.M. – Novosibirsk: Nauka. Sibirskaja izdatel'skaja firma RAN, 1995. – 112s.

Malinin Vladimir Vladislavovich

State University – Education Science Production Complex
Senior lecturer of department “Dynamics and strength of machines”
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,
E-mail: malinin2008@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 532.517.4:536.24

И.Е. ЛОБАНОВ, Б.Б. ФЛЕЙТЛИХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВЕРХНОСТНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКА НА БАЗЕ СЕМИСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Впервые разработана теоретическая модель расчёта и получены аналитические зависимости интенсифицированного теплообмена для плоского при турбулентном течении с двусторонним обогревом, интенсифицированных посредством периодически расположенных поверхностных турбулизаторов в зависимости от геометрических параметров канала, режимов течения теплоносителя, а также граничных условий теплообмена.

***Ключевые слова:** теплообмен, интенсификация, математическое моделирование, семислойные, турбулентный, турбулизатор, плоский канал.*

ВВЕДЕНИЕ

В современных теплообменных аппаратах и теплообменных устройствах широко используются теплообменные устройства с каналами, имеющими некруглое поперечное сечение, в частности, плоские каналы. Следует отметить, что в некоторых этих каналов теплообмен осуществляется не через всю омываемую поверхность. Кроме симметричного теплового нагружения плоского канала довольно часто имеет место асимметричное, т.е. тепловые потоки на различных поверхностях оказываются неодинаковыми: например, плоские каналы с односторонним обогревом или с двусторонним обогревом с разными тепловыми потоками. Для создания наиболее компактных теплообменных аппаратов и теплообменных устройств применяется интенсификация теплообмена. Интенсификация теплообмена в плоских каналах достигается, в основном, двумя путями: турбулизацией потока и развитием поверхности теплообмена. Может применяться комбинация вышеупомянутых методов интенсификации. Способ интенсификации теплообмена, связанный с развитием поверхности теплообмена, в большинстве случаев приводит к значительному увеличению стоимости каналов по сравнению с гладкими каналами, в то же время он может быть неэффективен для определённых режимных и физических параметров процесса теплообмена, а именно: эти устройства для интенсификации теплообмена имеют значительные по сравнению с несущим каналом размеры, что делает невозможным их применение в узких плоских каналах; данные устройства целесообразно применять при малых плотностях теплового потока, когда термическое сопротивление оребрения несущественно – с ростом тепловых потоков эффективность оребрения резко падает; при больших плотностях тепловых потоков применение оребрения нецелесообразно; также эффективность оребрения резко снижается при использовании материалов с низкой теплопроводностью (например, для нержавеющей стали); промышленное изготовление оребренных каналов гораздо сложнее, чем гладких, поэтому они обладают более высокой стоимостью по сравнению с последними. Интенсификация теплообмена в кольцевых каналах посредством установки поверхностных турбулизаторов лишена соответствующих недостатков, присущих развитию поверхности теплообмена [1]. Интенсификация теплообмена путём турбулизации потока не требует существенного увеличения внешних размеров плоских каналов и поэтому применима в любых плоских каналах. Изготовление турбулизаторов на поверхности кольцевых каналов не связано со значительными технологическими трудностями. Схема интенсификации теплообмена для плоского канала посредством уста-

новки турбулизаторов показана на рисунке 1. Нижнюю поверхность плоского канала (рис. 1) будем, по аналогии с кольцевым каналом, условно называть внутренней, а верхнюю — внешней. В рамках данного исследования рассматривается случай, когда турбулизаторы устанавливаются поверхности внутренней трубы. Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующий вывод: оптимальным методом интенсификации теплообмена в плоских каналах является применение периодических поверхностно расположенных турбулизаторов потока, который позволяет существенно интенсифицировать теплоотдачу при умеренном росте гидравлического сопротивления.

МОДЕЛЬ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВЕРХНОСТНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКА НА БАЗЕ СЕМИСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока производится по методике, аналогичной методике, применённой к кольцевым каналам с турбулизаторами [2–4]. Таким образом, данная теория позволяет описать с единых позиций интенсифицированный теплообмен как для круглых труб [4–12], так для кольцевых [2–4] и плоских каналов с турбулизаторами. При интенсификации теплообмена высота максимальной скорости в плоском канале (рис. 1), интенсифицированном посредством периодически расположенных поверхностных турбулизаторов, смещается в сторону поверхности, с меньшим коэффициентом сопротивления [13].

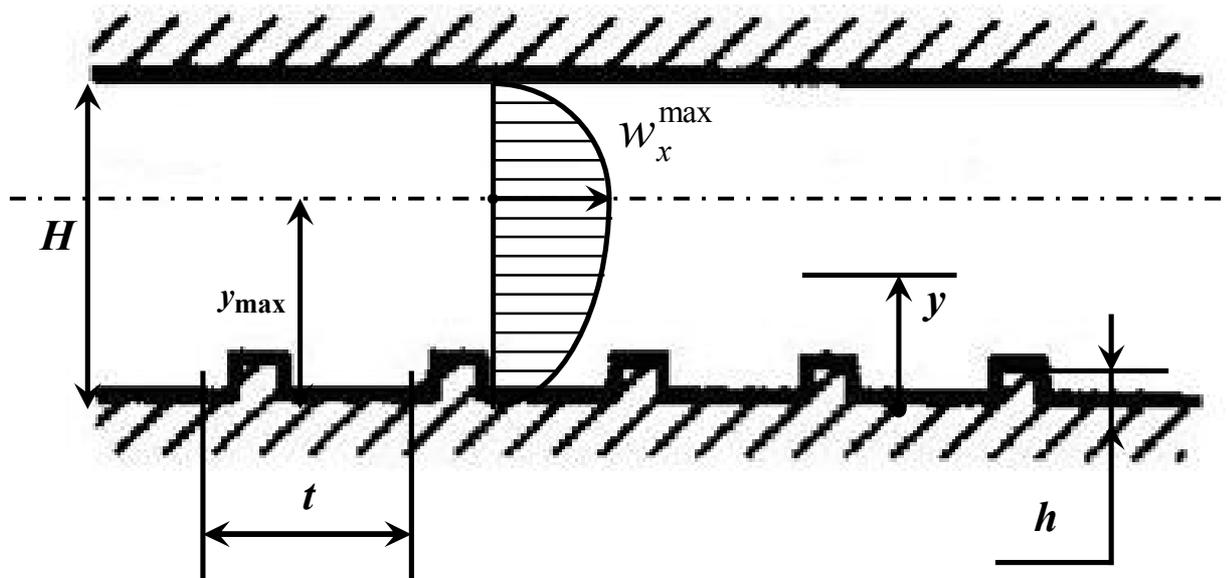


Рисунок 1 – Поперечное сечение плоского канала с турбулизаторами на одной стороне

Положение высоты максимальной скорости детерминируется со средней погрешностью до 0,5% (максимальное расхождение составило менее 2%) эмпирической формулой, полученной на основе обработки экспериментальных данных уилки, коуинна и барнетта, приведённых в [13]:

$$Y_{max} = \frac{y_{max}}{H} = \frac{1}{2} \left(\frac{\xi}{\xi_{гп}} \right)^{0,287}, \quad (1)$$

где $\xi/\xi_{гп}$ – отношения гидравлических сопротивлений поверхностей плоского канала с турбулизаторами к гладкой соответственно;

h – ширина плоского канала;

y_{max} – расстояние до сечения с максимальной скоростью;

$y=y/h$ – относительная поперечная координата.

Как и для случая с кольцевыми каналами [2–4], в данном исследовании принято, что диаметр гладкого канала равен диаметру канала, несущего оребрение, а скорость потока определялась по сечению канала, которое было бы при отсутствии оребрения. Вышеуказанный подход в полной мере правомерен, поскольку при рассматриваемом типе предельной турбулизации используются относительно невысокие выступы. В дальнейшем весь сравнительный анализ производился по эквивалентному диаметру плоского канала: $d_{\text{э}} = 2 \cdot H$. Число Нуссельта при стабилизированном течении для внутренней стенки $\text{Nu}_{1\infty}$ плоского канала с двусторонним подводом тепла, согласно [14, 15], равно:

$$\text{Nu}_{1\infty} = \left\langle \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\left(\int_0^y \frac{w_x}{w_x} dY - 1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{\mu_T}{\mu} \right)} dY + \frac{1}{2} \frac{q_{c2}}{q_{c1}} \int_0^1 \frac{\left(\int_0^y \frac{w_x}{w_x} dY - 1 \right)}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{\mu_T}{\mu} \right)} \left[\int_0^y \frac{w_x}{w_x} dY \right] dY \right\rangle^{-1}, \quad (2)$$

где q_{c2}/q_{c1} – заданное отношение тепловых потоков при наружном и внутреннем обогреве соответственно;

Pr – число Прандтля;

Pr_T – турбулентное число Прандтля;

μ – молекулярная динамическая вязкость;

μ_T – турбулентная динамическая вязкость;

w_x/\bar{w}_x – отношение продольной скорости потока к среднерасходной.

Таким образом, для расчёта интенсифицированного теплообмена в плоском канале с турбулизаторами необходимо определить интегралы, содержащиеся в (2), для всего канала. Для этого плоский канал разбивается на три подслоя с внешней (без турбулизаторов) стороны и на четыре подслоя с внутренней (с турбулизаторами) стороны, т.е. интенсифицированный теплообмен в плоском канале с турбулизаторами моделируется семислойной схемой турбулентного пограничного слоя: для гладкой стороны — вязкий подслой, промежуточный подслой, турбулентное ядро, для интенсифицированной стороны — вязкий подслой, промежуточный подслой, турбулентное ядро во впадине, турбулентное ядро. Расчёты интенсифицированного теплообмена как для круглых труб [4–12], так для кольцевых каналов [2–4] с турбулизаторами показали, что использование допущения $w_x/\bar{w}_x \cong 1$ относительно незначительно влияет на окончательный результат расчёта осреднённого теплообмена, поскольку интегральные методы довольно консервативны по отношению к профилю скорости — точно такой же вывод можно сделать относительно расчёта интенсифицированного теплообмена для условий плоского канала с турбулизаторами. Следовательно, имеет место возможность аналитического решения задачи об интенсифицированном теплообмене для плоского канала с турбулизаторами с двусторонним подводом тепла. Согласно принципу аддитивности, выражения для интегралов, входящих в правую часть выражения (2), для каждого из соответствующих подслоев I_i примут вид:

$$\text{Nu}_{1\infty} = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 I_i}; \quad (3)$$

где индексом i обозначены: 1, 2, 3, 4 – вязкий подслой, промежуточный подслой, вихревое ядро во впадине, турбулентное ядро соответственно для внутренней (поверхность которой интенсифицируется) поверхности плоского канала; 5, 6, 7 – турбулентное ядро, промежуточный подслой, вязкий подслой соответственно для внешней (поверхность которой гладкая) поверхности плоского канала. Таким образом, для расчета интенсифицированного теплообмена в плоском канале с турбулизаторами необходимо определить I_i для всего плоского канала, т.е. для выбранной семислойной схемы турбулентного пограничного слоя: для гладкой стороны – внешний вязкий подслой ($i = 7$), внешний промежуточный подслой ($i = 6$), внеш-

нее турбулентное ядро ($i = 5$), для интенсифицированной стороны – внутренний вязкий подслои ($i = 1$), внутренний промежуточный подслои ($i = 2$), внутреннее вихревое ядро во впадине ($i = 3$), внутреннее турбулентное ядро ($i = 4$).

Вышеуказанные подслои располагаются в следующих окрестностях (β и β_1 – коэффициенты в законе "третьей степени" для гладкой и шероховатой поверхностей; σ – постоянная, характеризующая начальную турбулентность; Re – число Рейнольдса).

1. Вязкий подслои (внутренний), расположенный в окрестности $Y \in \left[0; \frac{5}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right]$:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{\beta_1}{25} Re^3 Y^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (4)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = \frac{\xi}{16} Re \cdot Y. \quad (5)$$

2. Промежуточный подслои (внутренний), расположенный в окрестности

$$Y \in \left[\frac{5}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; \frac{30}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right];$$

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{Re}{5} Y \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1; \quad (6)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left[1 + \ln \left(\frac{Re}{5} Y \sqrt{\frac{\xi}{32}} \right) \right]. \quad (7)$$

3. Вихревое ядро во впадине (внутреннее), расположенное в окрестности

$$Y \in \left[\frac{30}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; \frac{h}{H} \right];$$

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{\xi}{32}} \left(1 - \frac{h}{H} \right) \frac{h}{H} Re; \quad (8)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left\{ 5,5 + \frac{1}{0,4} \ln \left[\left(1 - \frac{h}{H} \right) \frac{h}{H} Re \right] \right\}. \quad (9)$$

4. Турбулентное ядро (внутреннее), расположенное в окрестности $Y \in \left[\frac{h}{H}; Y_m \right]$:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \sigma Re; \quad (10)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = [1,325 \sqrt{\xi} + 1] \cdot Y^{\sqrt{\xi}}. \quad (11)$$

5. Турбулентное ядро (внешнее), расположенное в окрестности $Y \in \left[Y_m; 1 - \frac{30}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right]$:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \sigma Re; \quad (12)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = [1,325 \sqrt{\xi} + 1] \cdot Y^{\sqrt{\xi}}. \quad (13)$$

6. Промежуточный подслои (внешний), расположенный в окрестности

$$Y \in \left[1 - \frac{30}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 - \frac{5}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right];$$

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{\text{Re}}{5} (1-Y) \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1; \quad (14)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left[1 + \ln \left(\frac{\text{Re}}{5} (1-Y) \sqrt{\frac{\xi}{32}} \right) \right]. \quad (15)$$

7. Вязкий подслой (внешний), расположенный в окрестности $Y \in \left[1 - \frac{5}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 \right]$:

$$\frac{\mu_T}{\mu} = \frac{\beta}{25} \text{Re}^3 (1-Y)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (16)$$

$$\frac{w_x}{w_x} = \frac{\xi}{16} \text{Re} (1-Y). \quad (17)$$

Так как в данном исследовании для расчёта теплообмена используется вполне обоснованное допущение $w_x/\bar{w}_x \cong 1$ и, поскольку радиус максимальной скорости располагается в области турбулентного ядра, то возможно аналитическое решение задачи о теплообмене для всего турбулентного ядра в целом. В дальнейшем необходимо провести интегрирование для каждого из семи подслоёв. Для общего случая теплового нагружения удобнее проводить численное интегрирование. При относительно больших расстояниях между отдельными турбулизаторами регулярные вихри будут занимать только небольшую часть расстояния между ними. Поэтому схема с вихревым ядром в этом случае не будет справедливой: в этом случае граница вихревого ядра во впадине будет не линия $y=h$, а линия $h/R_0 = 30/\text{Re} \sqrt{\xi/32}$. Следовательно, когда высота турбулизаторов меньше толщины промежуточной области, т.е. в случае $h/R_0 \leq 30/\text{Re} \sqrt{\xi/32}$, имеет место элиминирование вихревого ядра во впадине.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РАСЧЁТНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛООБМЕНУ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Расчётные значения для теплообмена для воздуха в плоском канале с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока сравниваются с соответствующими экспериментальными данными различных авторов, наиболее полно представленными в [13]. Теоретические данные по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами, полученных по семислойной схеме турбулентного пограничного слоя для $\text{Re} = 3 \cdot 10^4$ и $h/d_3 = 0,0317 \div 0,0634$ сопоставлялись в [16] с наиболее надёжными и обоснованными экспериментальными данными, приведёнными в [13], где было показано очень хорошее согласование теории и эксперимента. Кроме представленного сравнения теории с экспериментом для относительно небольшого интервала определяющих параметров, необходим аналогичный анализ для более широкого диапазона чисел Рейнольдса, Прандтля и геометрических характеристик турбулизаторов. В таблице 1 расчётные данные по теплообмену, полученные по вышеприведённой семислойной схеме турбулентного пограничного слоя, для плоских каналов с турбулизаторами для широкого диапазона чисел Рейнольдса, Прандтля и геометрических характеристик турбулизаторов сравниваются с экспериментальными результатами различных авторов, приведёнными в [13]. Сопоставление расчёта и эксперимента, проведённое в таблице 1, доказывает, что теория довольно адекватно описывает существующий экспериментальный материал в очень широком диапазоне определяющих параметров.

ВЫВОДЫ

В представленном исследовании полученные результаты расчёта интенсифицированного теплообмена в плоских каналах с турбулизаторами в зависимости от вышеуказанных параметров, хорошо согласуются с существующими экспериментальными данными и имеют

перед последними неоспоримое преимущество, поскольку допущения, принятые при их выводе, охватывают гораздо более широкий диапазон определяющих параметров, чем ограничения, имеющиеся в экспериментах ($Pr = 0,7 \div 100$; $Re = 10^3 \div 10^6$; $h/d_{\text{Э}} = 0,005 \div 0,1$; $t/h = 1 \div 200$). По результатам расчётов на основе разработанной семислойной модели турбулентного пограничного слоя можно осуществлять оптимизацию интенсификации теплообмена в плоских каналах с турбулизаторами с двусторонним обогревом, а также управлять процессом интенсификации теплообмена.

Таблица 1 – Сравнение теоретических данных по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами, полученных по семислойной схеме турбулентного пограничного слоя с экспериментальными данными, приведёнными в [13], для широкого диапазона чисел Рейнольдса, Прандтля и геометрических характеристик турбулизаторов

Теплоноситель	$h/d_{\text{Э}}$	$t/d_{\text{Э}}$	Re	Nu/Nu _{грл}	
				Эксперимент	Теория
вода	0,033	0,2	$3 \cdot 10^4$	2,42	2,48
вода	0,033	0,433	$3 \cdot 10^4$	2,86	2,84
вода	0,033	0,867	$3 \cdot 10^4$	1,73	1,10
вода	0,033	1,733	$3 \cdot 10^4$	1,53	1,72
трансформаторное масло	0,033	0,867	$3 \cdot 10^4$	1,97	2,16
трансформаторное масло	0,033	0,2	$3 \cdot 10^4$	2,92	2,50
трансформаторное масло	0,033	0,433	$3 \cdot 10^4$	3,16	2,78
трансформаторное масло	0,033	1,733	$3 \cdot 10^4$	1,77	1,76
трансформаторное масло	0,033	0,3	$3 \cdot 10^4$	2,95	2,48
трансформаторное масло	0,033	0,22	$3 \cdot 10^4$	2,92	2,30
воздух	0,143	0,657	$3 \cdot 10^3$	1,32	1,33
воздух	0,0169	0,27	$2 \cdot 10^5$	2,02	1,98
воздух	0,0169	0,54	$2 \cdot 10^5$	1,67	1,80
воздух	0,0169	1,08	$2 \cdot 10^5$	1,42	1,52
воздух	0,0169	1,62	$2 \cdot 10^5$	1,33	1,39
воздух	0,0169	3,24	$2 \cdot 10^5$	1,23	1,24
воздух	0,0286	1,86	10^4	1,35	1,19
воздух	0,0286	1	10^4	1,40	1,26
воздух	0,0286	0,657	10^4	1,29	1,18
воздух	0,0543	1,86	10^4	1,72	1,56
воздух	0,0658	1	10^4	1,86	1,80
воздух	0,0715	0,657	10^4	1,82	1,65
воздух	0,143	1,86	10^4	2,57	2,48
воздух	0,143	1	10^4	2,82	3,36
воздух	0,0715	0,657	10^4	2,16	2,53
воздух	0,0543	1,86	10^4	1,40	1,31
воздух	0,0658	1	10^4	1,45	1,51
воздух	0,0715	0,657	10^4	1,305	1,41
воздух	0,143	1,86	10^4	1,74	1,91
воздух	0,143	1	10^4	1,70	1,67

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин, Э.К. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.

2. Дрейцер, Г.А. Моделирование теплообмена в кольцевых каналах с турбулизаторами с помощью семислойной модели турбулентного пограничного слоя / Г.А. Дрейцер, И.Е. Лобанов // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 402. № 2. – С. 184 – 188.
3. Лобанов, И.Е. Моделирование теплообмена в кольцевых каналах с турбулизаторами с помощью семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XV Шк.-сем. молодых учёных и специалистов под руководством ак. РАН А.И.Леонтьева. М.: МЭИ, 2005. Т.1. – С. 103 – 106.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. М., 2005. – 632 с.
5. Dreitsler G.A., Myakotchin A.S., Lobanov I.E. A simple method for evaluation of heat transfer enhancement in tubular heat exchangers under single-phase flow, boiling, condensation and fouling conditions // Proceeding of the Third International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries held at the Davos Congress Centre. Davos (Switzerland), 2001. – P. 445 – 455.
6. Dreitsler G.A., Myakotchin A.S., Lobanov I.E. Effective Heat Transfer Enhancement in Tubular Heat Exchangers under Single-Phase Flow, Boiling, Condensation and Fouling Conditions // International Journal of Heat Exchangers. 2002. V. III. № 3. – P. 105 – 127.
7. Лобанов, И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей в условиях интенсификации теплообмена / Лобанов И.Е. // Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен: труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 6. М.: МЭИ, 2002. – С. 140 – 143.
8. Дрейцер, Г.А. Исследование предельной интенсификации теплообмена в трубах за счёт искусственной турбулизации потока / Г.А. Дрейцер, И.Е. Лобанов // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40. – № 6. – С. 958 – 963.
9. Дрейцер, Г.А. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена / Г.А. Дрейцер, И.Е. Лобанов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 1. – С. 54 – 60.
10. Dreitsler G.A., Lobanov I.E. Modelling of Heat Transfer and Hydraulic Resistance of Turbulent Gas and Liquid Flow in Tubes with Circular Turbulizers // Proceeding of the Fourth International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries held at the Fodele Beach Hotel. Crete Island (Greece), 2003. – P. 139 – 147.
11. Дрейцер, Г.А. Моделирование предельной интенсификации теплообмена в трубах за счёт искусственной турбулизации потока для различных теплоносителей с постоянными и переменными теплофизическими свойствами / Г.А. Дрейцер, И.А. Лобанов // Тезисы докладов и сообщений V Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2004. – Т. 1. – С. 67—69.
12. Дрейцер, Г.А. Моделирование предельной интенсификации теплообмена в трубах за счёт искусственной турбулизации потока для различных теплоносителей с постоянными и переменными теплофизическими свойствами / Г.А. Дрейцер, И.А. Лобанов // Труды V Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2004. – Т.1. – № 27. – С. 1 – 9.
13. Калинин, Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.
14. Новиков, И.И. Прикладная термодинамика и теплопередача / И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский. – М.: Госатомиздат, 1961. – 548 с.
15. Новиков, И.И. Прикладная термодинамика и теплопередача / И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский. – М.: Атомиздат, 1977. – 349 с.
16. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. – 288 с.

Лобанов Игорь Евгеньевич

Московский Авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва
 Доктор технических наук, ведущий науч. сот. Проблемной научно-исследовательской лаборатории ПНИЛ – 204
 Тел. (495)158-42-68
 E-mail: lloobbaannooff@live.ru

Флейтлих Борис Борисович

Московский Авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва
 Аспирант кафедры 204 "Авиационная и ракетно-космическая теплотехника"
 Тел. (495)158-42-68
 E-mail: heat204@mai.ru

I.E. LOBANOV, B.B. FLEYTLICH

**MODELLING OF INTENSIFIED HEAT EXCHANGE
AT TURBULENT CURRENT IN FLAT CHANNELS
WITH PERIODICALLY SUPERFICIALLY LOCATED
VORTEX GENERATOR A STREAM ON THE BASIS OF SEVEN-LAYER
MODEL OF A TURBULENT BOUNDARY LAYER**

Theoretical model of account for the first time is developed and the analytical dependences intensification of heat exchange for flat are received at turbulent current with bilateral heating, intensification by means of periodically located superficial turbulizers depending on geometrical parameters of the channel, modes of current of the heat-carrier, and also boundary conditions of heat exchange.

Key words: heat exchange, intensification, mathematical modeling, seven-layer, turbulent, turbulizer, plane channel.

BIBLIOGRAPHY

1. Kalinin, Je.K. *Jefferektivnye poverhnosti teploobmena* / Je.K. Kalinin, G.A. Drejcer, I.Z. Kopp i dr. – M.: Jenergoatomizdat, 1998. – 408 s.
2. Drejcer, G.A. Modelirovanie teploobmena v kol'cevyyh kanalakh s turbulizatorami s pomow'ju se-mislojnoj modeli turbulentnogo pogramichnogo sloja / G.A. Drejcer, I.E. Lobanov // *Doklady Akademii Nauk*. 2005. T. 402. № 2. – S. 184 – 188.
3. Lobanov, I.E. Modelirovanie teploobmena v kol'cevyyh kanalakh s turbulizatorami s pomow'ju se-mislojnoj modeli turbulentnogo pogramichnogo sloja // *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v jenerge-ticheskikh ustanovkah*: Trudy XV Shk.-sem. molodyh uchjonyh i specialistov pod rukovodstvom ak. RAN A.I.Leont'eva. M.: MJeI, 2005. T.1. – S. 103 – 106.
4. Lobanov I.E. *Matematicheskoe modelirovanie intensificirovannogo teploobmena pri turbulent-nom techenii v kanalakh*: Diss. ... dokt. tehn. nauk. M., 2005. – 632 s.
5. Dreitser G.A., Myakotchin A.S., Lobanov I.E. A simple method for evaluation of heat transfer enhancement in tubular heat exchangers under single-phase flow, boiling, condensation and fouling conditions // *Proceeding of the Third International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries held at the Davos Congress Centre. Davos (Switzerland), 2001.* – P. 445 – 455.
6. Dreitser G.A., Myakotchin A.S., Lobanov I.E. Effective Heat Transfer Enhancement in Tubular Heat Exchangers under Single-Phase Flow, Boiling, Condensation and Fouling Conditions // *International Journal of Heat Exchangers*. 2002. V. III. № 3. – P. 105 – 127.
7. Lobanov, I.E. Modelirovanie teploobmena i soprotivlenija pri turbulentnom techenii v kanalakh teplonositelej v uslovijah intensifikacii teploobmena / Lobanov I.E. // *Intensifikacija teploobmena. Ra-diacionnyj i slozhnyj teploobmen*: trudy Tret'ej Rossijskoj nacional'noj konferencii po teploobmenu. V 8 tomah. T. 6. M.: MJeI, 2002. – S. 140 – 143.
8. Drejcer, G.A. Issledovanie predel'noj intensifikacii teploobmena v trubah za schjot iskusstven-noj turbulizacii potoka / G.A. Drejcer, I.E. Lobanov // *Teplofizika vysokih temperatur.* – 2002. – T. 40. – № 6. – S. 958 – 963.
9. Drejcer, G.A. Modelirovanie izotermicheskogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh v uslovijah intensifikacii teploobmena / G.A. Drejcer, I.E. Lobanov // *Teplojenergetika.* – 2003. – № 1. – S. 54 – 60.
10. Dreitser G.A., Lobanov I.E. Modelling of Heat Transfer and Hydraulic Resistance of Turbulent Gas and Liquid Flow in Tubes with Circular Turbulizers // *Proceeding of the Fourth International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries held at the Fodele Beach Hotel. Crete Island (Greece), 2003.* – P. 139 – 147.
11. Drejcer, G.A. Modelirovanie predel'noj intensifikacii teploobmena v trubah za schjot iskusst-vennoj turbulizacii potoka dlja razlichnyh teplonositelej s postojannymi i peremennymi teplofizicheskimi svojstvami / G.A. Drejcer, I.A. Lobanov // *Tezisy dokladov i soobwenij V Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu.* Minsk, 2004. – T. 1. – S. 67—69.
12. Drejcer, G.A. Modelirovanie predel'noj intensifikacii teploobmena v trubah za schjot iskusst-vennoj turbulizacii potoka dlja razlichnyh teplonositelej s postojannymi i peremennymi teplofizicheskimi svojstvami / G.A. Drejcer, I.A. Lobanov // *Trudy V Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu.* Minsk, 2004. – T.1. – № 27. – S. 1 – 9.
13. Kalinin, Je.K. *Intensifikacija teploobmena v kanalakh* / Je.K. Kalinin, G.A. Drejcer, S.A. Jarho. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 220 s.

14. Novikov, I.I. Prikladnaja termodinamika i teploperedacha / I.I. Novikov, K.D. Voskresenskij. – M.: Gosatomizdat, 1961. – 548 s.
15. Novikov, I.I. Prikladnaja termodinamika i teploperedacha / I.I. Novikov, K.D. Voskresenskij. – M.: Atomizdat, 1977. – 349 s.
16. Lobanov I.E., Shtejn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivirovannym tep-loobmenom dlja metallurgicheskogo proizvodstva. (Obwaja teorija intensivirovannogo teploobmena dlja tep-loobmennyh apparatov, primenjaemyh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-h tomah. Tom III. Matematicheskoe modelirovanie intensivirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalah s primeneniem mnogoslojnyh, supermnogoslojnyh i kompaundnyh modelej turbulentnogo pograničnogo sloja. M.: MGAKHiS, 2010. – 288 s.

Lobanov Igor Eugenievich

Moscow Aviation Institute (state technical university), Moscow

Doctor of technical science, leading research assistant of fundamental scientific research laboratory PNIL – 204

Tel. 495-158-42-68

E-mail: lloobbaannooff@live.ru

Fleitlich Boris Borisovich

Moscow Aviation Institute (state technical university), Moscow

Post-graduate student of department 204 “Aviation and rocket space heat technics”

Tel. 495-158-42-68

E-mail: heat204@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.438

О.О. КАРЕЛИН, А.Е. РЕМИЗОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ РАСШИРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВХОДНОЙ ЗАКРУТКИ ПОТОКА

Представлены результаты исследования характеристик межтурбинных переходных каналов с варьируемой диффузорностью при различной входной закрутке.

Ключевые слова: турбина, диффузор, закрутка потока.

Межтурбинный переходный канал – это обязательный элемент большинства авиационных и промышленных газотурбинных двигателей, который появляется при обеспечении наибольшей эффективности работы турбины газогенератора, турбины низкого давления или силовой турбины. Межтурбинный переходный канал оказывает непосредственное влияние на условия работы турбины низкого давления и силовой турбины и, следовательно, на работу всего двигателя. Поэтому на межтурбинный переходный канал накладывается жесткие ограничения по величине потерь давления. Кроме того, при проектировании турбины низкого давления и силовой турбины для обеспечения их высокой эффективности необходимо знать распределение параметров на входе, а распределение этих параметров во многом зависит от особенностей течения в переходном канале.

Модификация авиационных газотурбинных двигателей, как правило, осуществляется за счет каскада низкого давления, а модификация промышленных газотурбинных установок – за счет силовой турбины. Поэтому межтурбинный переходный канал в условиях модификации двигателей занимает одно из основных мест, так как во многом определяет условия работы модифицированных турбин. Модификация газотурбинных двигателей в целях повышения их мощности сопровождается либо увеличением числа ступеней турбины, либо увеличением ее диаметра. Увеличение диаметра приводит к росту диффузорности межтурбинного переходного канала.

Проведенный анализ статистических данных показал, что диффузорность большинства межтурбинных переходных каналов находится в диапазоне $q=1...2,2$, что по данным J. Howard [1] соответствует безотрывному, предотрывному и отрывному режиму течения. Течение газа в межтурбинных переходных каналах в большинстве случаев оказывается сложным и предрасположено к отрыву с высоким уровнем потерь.

В связи с применением высокоперепадных турбин высокого давления и широким диапазоном режимов их работы, межтурбинные переходные каналы часто работают в условиях входной закрутки потока, которая может изменяться в пределах $0^\circ...30^\circ$ и иметь различное распределение по радиусу: уменьшаться, увеличиваться или иметь распределение по радиусу близкое к постоянному.

Влияние входной закрутки на аэродинамическую эффективность кольцевых диффузоров часто носит сложный и неоднозначный характер. Умеренная закрутка потока на входе в диффузор или патрубок может быть использована для улучшения его работы. Анализ результатов исследований М.Е. Дейча, А.Е. Зарянкина, С.А. Довжика, В.М. Картавенко [2], Е.Н. Богомолова, А.Е. Ремизова, И.В. Полякова [3, 4], И.Г. Гоголева, В.К. Мигая, Э.И. Гудкова, R. Lohmann, Y. Senoo, показал, что минимум потерь в диффузорных каналах с различными геометрическими параметрами может существовать при входной закрутке от 0° до 30° .

Эффективность работы переходных каналов будет определяться их геометрическими параметрами, величиной и типом входной закрутки. Совместное влияние диффузорности и входной закрутки на эффективность работы межтурбинных переходных каналов оказывается мало изученным. Так влияние диффузорности исследовалось при осевом входе потока, а влияние закрутки исследовалось для каналов постоянной диффузорности. Единичные исследования совместного влияния диффузорности и закрутки (работы ЦАГИ, ASME) ограничивались варьированием указанных параметров в весьма узких пределах, не отвечающих интересам практики.

Наибольший интерес представляет исследование характеристик межтурбинных переходных каналов с диффузорностью $q=1...2,2$ при входной закрутке $\alpha_1=0^\circ...30^\circ$ различного типа. Исследования в этих диапазонах параметров и были предприняты в данной работе.

Для решения поставленных задач использовался аэродинамический эксперимент.

Экспериментальная установка (рис. 1) позволяла проводить исследования характеристик межтурбинных переходных каналов с диффузорностью $q=1...2,2$ при входной закрутке $\alpha_1=0^\circ...30^\circ$ с тремя вариантами распределения закрутки по радиусу. Варьирование диффузорности каналов достигалось путем изменения угла наклона внутренней стенки. Закручивающая решетка с тремя сменными комплектами лопаток задавала распределение углов потока, типичное для выходного сечения турбин высокого давления: закрутка постоянная по высоте (комплект 1), закрутка увеличивается к внутренней стенке (комплект 2), закрутка увеличивается к наружной стенке (комплект 3).

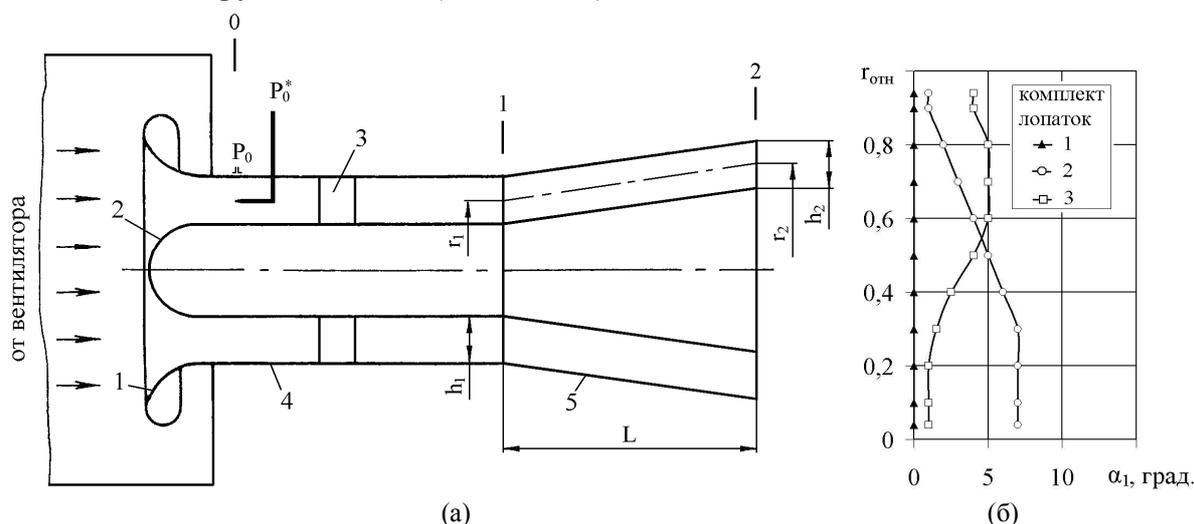


Рисунок 1 – Модель межтурбинного переходного канала (а) и характеристика закручивающего устройства (б)

1 – входная лемниската; 2 – кок; 3 – закручивающая решетка с тремя сменными комплектами лопаток; 4 – кольцевой закручивающий канал; 5 – модель диффузора

Принцип организации измерений, методика испытаний и обработки данных позволили получить достоверные характеристики межтурбинных переходных каналов на основании измерения полей параметров потока на входе и выходе из канала. Шаг перемещения насадка в окружном направлении составлял 10° , в радиальном – 5 мм в ядре потока и 2 мм вблизи стенок. Измерение направления вектора скорости в окружном направлении осуществлялось по трем окружным траверсам с таким же шагом в радиальном направлении. Измерения параметров потока проводились с помощью газодинамического измерительного стенда с программным заданием координат точек замера давления и автоматическим сообщением параметров ЭВМ.

Коэффициент внутренних потерь исследуемого диффузора определялся как

$$\zeta_D = \zeta_{уст} - \zeta_K$$

где $\zeta_{уст} = \frac{P_0^* - P_2^*}{P_0^* - P_0}$ – коэффициент внутренних потерь всей установки;

$\zeta_K = \frac{P_0^* - P_1^*}{P_0^* - P_0}$ – коэффициент внутренних потерь закручивающего канала.

Осреднение потерь проведено по площади выходного сечения.

Изменение угла закрутки при течении закрученного потока в каналах определялось как разность углов по входу и выходу. Положительные значения $\Delta\alpha$ соответствуют выравниванию потока (приближению к осевому направлению), а отрицательные – дополнительному закручиванию.

При исследовании моделей межтурбинных переходных каналов выполнялись условия геометрического, кинематического и динамического подобия. Геометрические параметры исследуемых диффузоров выбраны в соответствии с таковыми для типичных межтурбинных переходных каналов.

Исследования проводились при среднерасходной скорости во входном сечении $c_0=37$ м/с, что соответствует числу Маха $M=0,11$ и числу Рейнольдса, рассчитанному по гидравлическому диаметру и параметрам рабочего тела во входном сечении модели, $Re=2,6 \cdot 10^5$. Исследования проводились в области автомодельности по числу Рейнольдса в допущении о несжимаемости рабочего тела.

Для подтверждения достоверности результатов эксперимента предусматривалась система их проверок. Погрешность измерения углов потока составляет $\pm 0,5^\circ$. Погрешность определения потерь составляет $\pm 6\%$.

В результате экспериментального исследования было получено распределение потерь по высоте проточной части исследуемых диффузоров при разных типах закрутки. Результаты испытаний показали, что влияние входной закрутки на аэродинамическую эффективность кольцевых диффузоров носит сложный и неоднозначный характер, что связано с особенностями течения закрученного потока вблизи наружной и внутренней стенок и с изменяющимся вкладом пристеночных течений в общие потери в канале. При этом доли потерь, генерируемых в пристеночных областях, различаются, что обуславливает существование оптимальной, с точки зрения потерь, входной закрутки потока при постоянной по радиусу входной закрутке (рис. 2). При этом оптимальная величина входной закрутки зависит от диффузорности канала. В то же время закрутка, увеличивающаяся к внутренней и наружной стенке, не приводит к появлению минимума потерь в исследуемых диффузорах, так как определяющей величиной потерь является только одна из поверхностей у которой закрутка максимальная.

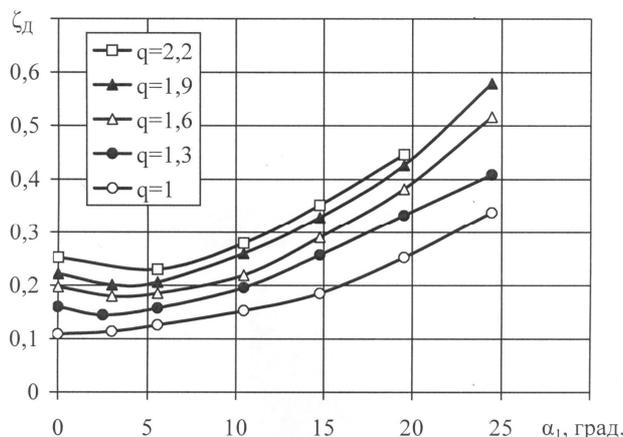


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов внутренних потерь исследуемых диффузоров от величины входной закрутки (комплект лопаток 1)

Таким образом, получена зависимость оптимальной, с точки зрения потерь, величины входной закрутки от диффузорности канала и типа распределения входной закрутки по ра-

диусу (рис. 3). При постоянной по высоте закрутке, оптимальная величина закрутки на входе в диффузор увеличивается от 0° до 6° с увеличением диффузорности от 1 до 2,2. При закрутке, увеличивающейся к внутренней и наружной стенке, оптимальная величина закрутки на входе в диффузор практически не меняется с увеличением диффузорности канала и составляет соответственно 5° и 1°. Полученные результаты хорошо согласуются с опытными данными различных исследователей.

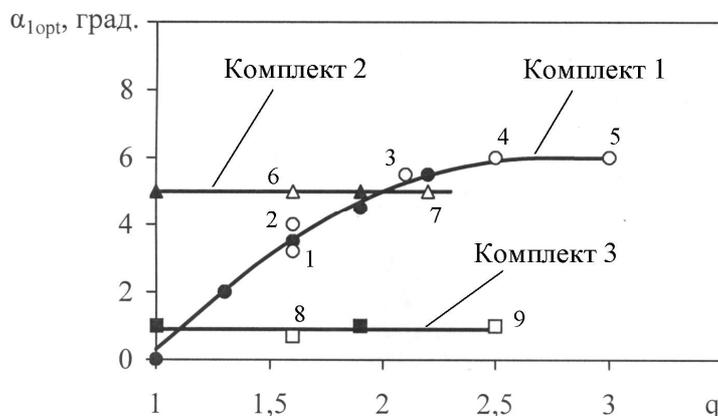


Рисунок 3 – Оптимальная по потерям входная закрутка в диффузорах
 ●, ▲, ■ – исследуемые диффузоры; 1-9 – опытные данные различных исследователей

Получены данные по изменению угла закрутки при течении закрученного потока в диффузорах, подтвердившие сделанное ранее предположение А.Е. Ремизова и И.В. Полякова [4] о зависимости изменения углов потока по длине диффузора от его геометрических параметров. Оказалось, что с увеличением диффузорности выравнивающая способность уменьшается, а закручивающая – возрастает (рис. 4), причем величина изменения угла зависит еще и от характера изменения входной закрутки по радиусу, но его влияние существенно меньше, чем влияние диффузорности.

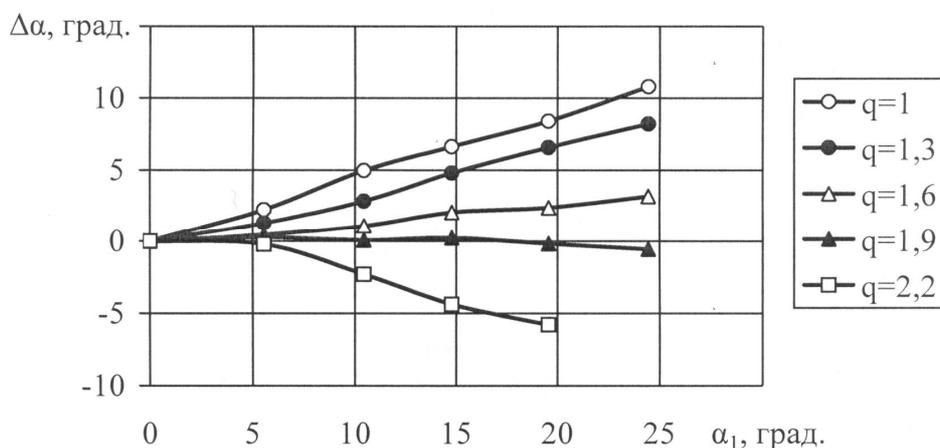


Рисунок 4 – Изменение угла закрутки в диффузоре (комплект лопаток 1)

Получена зависимость (рис. 5) изменения углов потока по длине диффузора от относительной длины и эквивалентного угла раскрытия

$$\gamma_{эке} = 2 \cdot \arctg \left[\frac{q-1}{2 \cdot L/h_1} \right]$$

В диффузорах, геометрические параметры которых находятся ниже линии начала отрыва, наблюдается выравнивание потока, а выше – дополнительное закручивание. Полученные результаты хорошо согласуются с опытными данными различных исследователей (на рис. 5 в скобках указано относительное изменение угла в диффузоре).

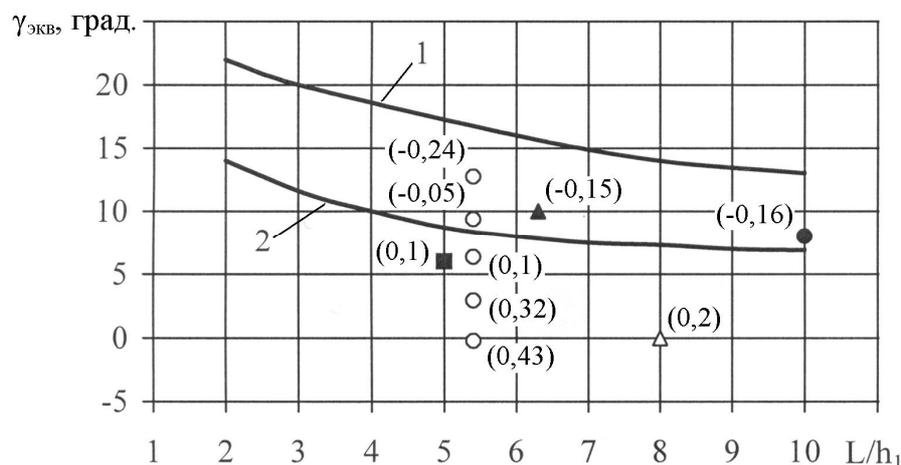


Рисунок 5 – Характеристика исследуемых диффузоров
 1 – линия максимальных коэффициентов восстановления статического давления в диффузорах; 2 – граница начала отрыва в кольцевых диффузорах; ○ – исследуемые диффузоры

Таким образом, в работе получены следующие выводы.

При постоянной по высоте закрутке, оптимальная, с точки зрения уменьшения потерь, величина закрутки на входе в межтурбинный переходный канал увеличивается от 0° до 6° с увеличением диффузорности от 1 до 2,2. При закрутке, увеличивающейся к внутренней и наружной стенке, оптимальная величина закрутки на входе в межтурбинный переходный канал практически не меняется с увеличением диффузорности и составляет соответственно 5° и 1°.

В межтурбинных переходных каналах, геометрические параметры которых соответствуют безотрывному течению, наблюдается выравнивание потока, а при отрывном течении имеет место дополнительное закручивание. С увеличением диффузорности выравнивающая способность уменьшается, а закручивающая – возрастает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howard J.H. Performance and flow regimes for annular diffusers // ASME. – Paper 67.
2. Довжик С.А. Экспериментальное исследование влияния закрутки потока на эффективность кольцевых каналов и выходных патрубков осевых турбомашин // Промышленная аэродинамика. – Вып. 31. – 1974. – С. 94–109.
3. Богомолов Е.Н. Исследование аэродинамики диффузорных течений применительно к задачам проектирования межтурбинных переходников // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. – 2007. – № 2. – С. 3–30.
4. Поляков И.В. Влияние входной закрутки потока на параметры течения в модельном межтурбинном переходном канале // Инженерный журнал. – М.: Машиностроение. – 2007. – № 8. – С. 35–38.
5. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. Киев: Наук. Думка, 1989. – 192 с.

Карелин Олег Олегович

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск
 Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Авиационные двигатели»
 Тел. (4855) 24-30-04
 E-mail: Karelin2008rgata@mail.ru

Ремизов Александр Евгеньевич

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели»
 Тел. (4855) 28-04-71

O.O. KARELIN, A.E. REMIZOV

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF GAS DYNAMIC EFFICIENCY AND KINEMATIC CHARACTERISTICS OF ADAPTER CHANNELS WITH DIFFERENT WIDENING UNDER INFLOW TWISTING CONDITIONS

The investigation results of interturbine adapter channels with a variable diffuser capacity at different inflow twisting are presented.

Key words: turbine, diffuser, inflow twisting.

BIBLIOGRAPHY

1. Howard J.H. Performance and flow regimes for annular diffusers // ASME. – Paper 67.
2. Dovzhik S.A. Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija zakrutki potoka na jeffektivnost' kol'ce-vyh kanalov i vyhodnyh patrubkov osevyh turbomashin // Promyshlennaja ajerodinamika. – Vyp. 31. – 1974. – S. 94–109.
3. Bogomolov E.N. Issledovanie ajerodinamiki diffuzornyh techenij primenitel'no k zadacham proek-tirovanija mezhturbinyh perehodnikov // Vestnik RGATA im. P.A. Solov'eva. – 2007. – №2. – S. 3–30.
4. Poljakov I.V. Vlijanie vhodnoj zakrutki potoka na parametry techenija v model'nom mezhturbinnom perehodnom kanale // Inzhenernyj zhurnal. – M.: Mashinostroenie. – 2007. – №8. – S. 35–38.
5. Halatov A.A. Teorija i praktika zakruchennyh potokov. Kiev: Nauk. Dumka, 1989. – 192 s.

Karelin Oleg Olegovich

Rybinsk state aviation technological academy named after P.A. Solovyev, Rybinsk

Candidate of technical science, assistant of department “Aviation engines”

Tel. 4855-24-30-04

E-mail: Karelin2008rgata@mail.ru

Remizov Aleksandr Evgenievich

Rybinsk state aviation technological academy named after P.A. Solovyev, Rybinsk

Candidate of technical science, assistant of department “Aviation engines”

Tel. 4855-28-04-71

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКИ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ ДБМ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗЕРВОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В работе представлен метод ведения испытаний электрического двигателя как комплексная процедура. Автоматизация и оптимизация процесса заключается в применении современных компьютерных технологий. Производится снятие информации при функционировании привода, аккумулирование ее в единую базу данных. Обработка информации, ее мониторинг и анализ возможны как в процессе испытаний, так и после. Данный подход универсален и может быть применён для различных технических систем и отдельных их элементов. Акцент делается на сложные наукоёмкие объекты.

Ключевые слова: комплексные испытания, двигатель бесконтактный моментный, испытательный стенд, виртуальный прибор.

На сегодняшний день стендовые испытания являются важнейшим этапом любого производства, нацеленного на выпуск технической продукции. Уже на начальных этапах разработки нового оборудования необходимо располагать надёжными данными о реально достижимых характеристиках компонентов оборудования, поэтому в комплексе разнообразных задач, решаемых как при разработке, так и при производстве и эксплуатации готовых изделия, стендовые испытания играют решающую роль. На рисунке 1 представлена структурная схема технологического процесса разработки и изготовления наукоёмкой продукции и место испытаний и контроля в общем процессе.



Рисунок 1 – Схема технологического процесса производства изделия

В настоящее время к испытательным стендам предъявляются следующие требования:

1. возможность измерения сигналов с различных типов датчиков;
2. большое количество входных каналов измерения;
3. встроенные схемы согласования сигналов;
4. возможность дискретного управления исполнительными элементами стенда и испытываемого изделия;
5. высокая надёжность и в том числе механическая прочность и виброустойчивость;
6. возможность автоматического создания протоколов испытаний;
7. высокая производительность – возможность сбора и обработки данных в режиме реального времени, возможность проведения испытаний в параллельном режиме;
8. возможность постобработки и сохранения больших объёмов измеренных данных;
9. функционально гибкое программное обеспечение, дающее возможность корректирования программ стендовых испытаний непосредственно во время их проведения.

Современный процесс испытаний – задача, требующая комплексных и взаимосвязанных решений. Сложные наукоёмкие технические объекты требуют наибольших ресурсов в

данном направлении. Двигатель серии ДБМ (двигатель бесконтактный моментный) является одним из таких объектов, рисунок 2 и 3.

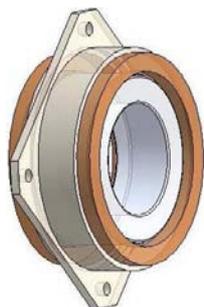


Рисунок 2 – Двигатель бесконтактный моментный

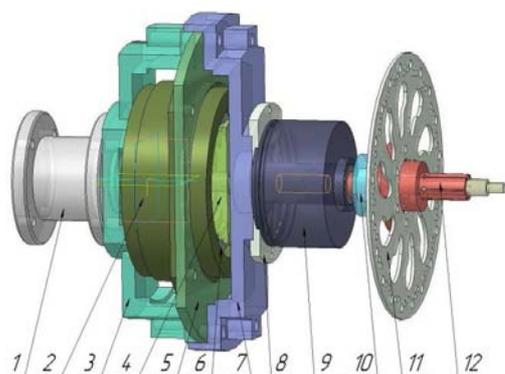


Рисунок 3 – Испытательный стенд

На сегодняшний день сложилась ситуация, когда возросли требования к оперативности, комплексности, точности, удобству измерений и расчетов, с одной стороны, что невозможно без развития компьютерных технологий, с другой стороны. Таким образом, была поставлена цель: оптимизировать процесс испытаний кинематических, силовых, энергетических параметров двигателей серии ДБМ. В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

- получение экспериментальных данных в режиме реального времени;
- оперативная обработка данных и процесса захвата;
- визуализация происходящих процессов;
- подготовка методического и лингвистического обеспечения.

Объектом экспериментального исследования является двигатель ЗДБМ-120-1,6-0,4-3, - ОАО «Машиноаппарат», г. Москва, как элемента привода АМИЕ.421314.023, - ОАО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург. Используя оборудование фирмы National Instruments, программу LabView-2009, DIAdem, систему кинематических и тензодатчиков, была выполнена разработка стенда по исследованию характеристик двигателя рис.3, 3D модель стенда изображена на рисунок 4.



- 1 – датчик момента;
- 2 – статор двигателя;
- 3 – крышка корпуса левая;
- 4 – держатель ротора;
- 5 – вставка крепёжная;
- 6 – ротор;
- 7 – крышка корпуса правая;
- 8 – вставка центрирующая для датчика положения;
- 9 – датчик положение;
- 10 – опорный подшипник;
- 11 – тормозной диск;
- 12 – ступица тормозного диска

Рисунок 4 – 3D модель испытательного стенда

Используемое оборудование и программное обеспечение:

- кинематический датчик углового положения ЛИР-158А-2-Н-002500-05-ПИ-5 (Санкт-Петербург, Россия);
- датчик момента TORQUE METERS TCN-2K (DACEL, Корея);
- плата сбора данных USB-6251 (Техас, США);
- секундомер, фотоаппарат OLIMPUS E-500, система кабелей, блок питания;
- LabVIEW 2009, NI-DAQmx – 9.02, DIAdem-2011 (Техас, США).

Непосредственной целью создания разработки являлось получение возможности определения основных характеристик механизмов мехатронных модулей, таких как:

- момент холостого хода;
- скорость холостого хода;
- пусковой момент;
- момент-скоростная характеристика;
- определение мощности работы двигателя в различных режима.

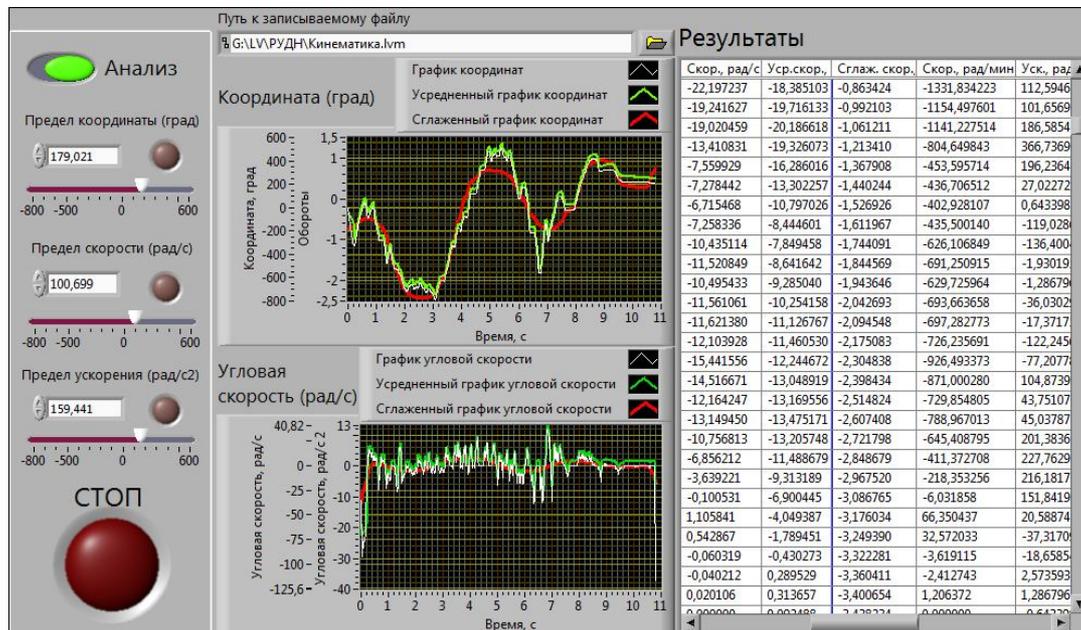


Рисунок 5 – Лицевая панель виртуального прибора для определения кинематических характеристик

Двигатель вращает вал, на котором установлены датчики координаты и момента. Вал жестко связан с тормозным устройством, которое создает нагрузку. Были разработаны виртуальные приборы по захвату, обработке и записи данных, - рисунки 5 и 6. Получены основные кинематические характеристики двигателя, а именно: угловые координаты (град, рад), угловые скорости (рад/с, рад/мин), угловые ускорения (рад/с²), частота вращения (об/с, об/мин), момент (Н·м). Данные обрабатывались средствами математической статистики.

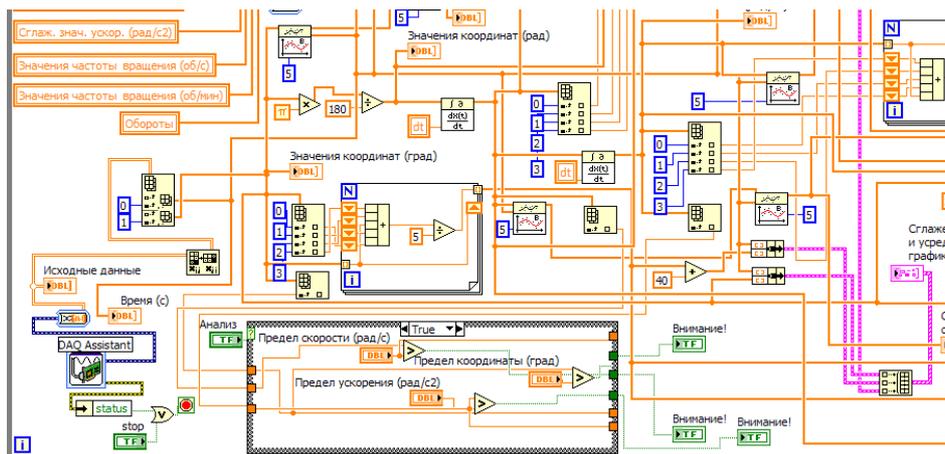


Рисунок 6 – Фрагмент Блок-диаграммы виртуального прибора по определению кинематических характеристик двигателя

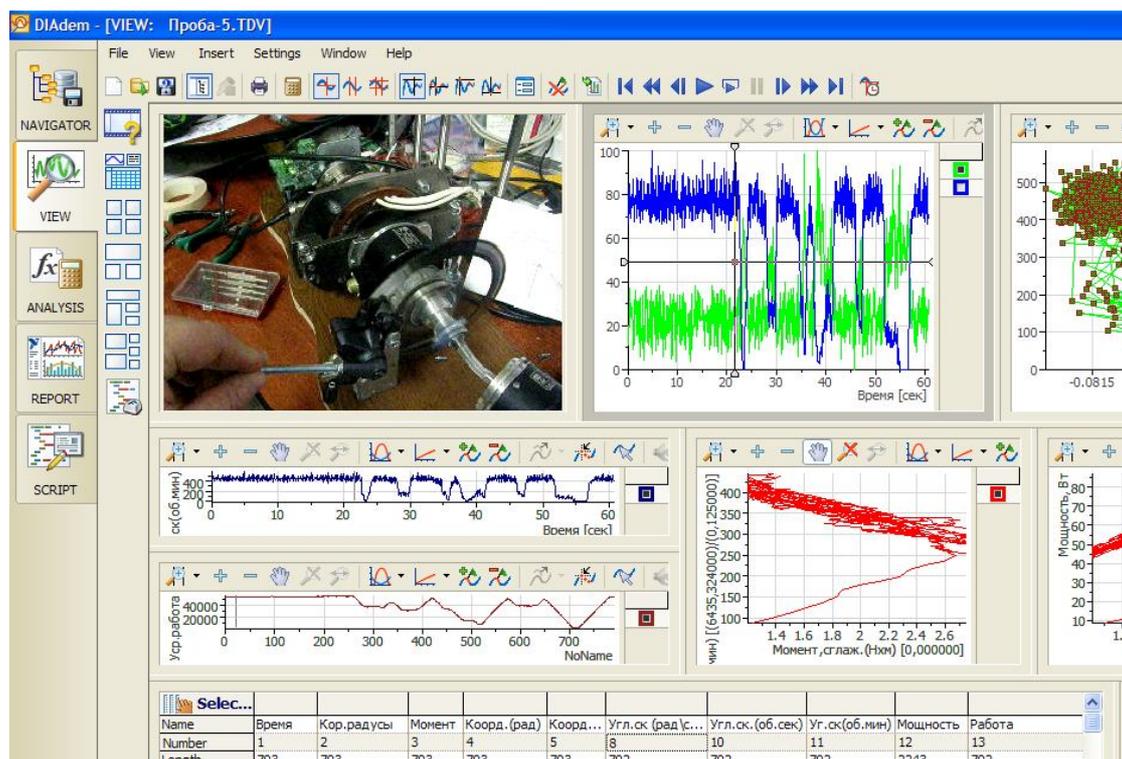


Рисунок 7 – Мониторинг результатов (среда DIAdem), фрагмент

Данная разработка позволила вывести на новый качественный уровень этапы испытания и контроля параметров двигателя. Прделанная работа направлена на развитие наукоёмких технологий в области выпуска энергосберегающих и энергоэффективных приводов. Усилению взаимовыгодных отношений в научной, технической и коммерческой сферах с заводом по производству данных двигателей ОАО «Машаппарат», г. Москва.

Таким образом, использование оборудования компании National Instruments DIAdem для обработки и визуализации, результатов эксперимента позволило решить поставленную задачу наиболее эффективным образом (рисунок 7).

Перспективой разработки данного стенда является:

- использование пакета NI Motion (National Instruments) для управления двигателем;
- исследование параметров работы двигателя в динамических режимах;
- использование пакета NI Sound and Vibration (National Instruments) для исследования свойств двигателя в режимах вибронагрузок;
- исследование температурных полей при функционировании двигателя в различных режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DIAdem, Обработка и анализ данных, генерация отчётов, - М.: NI Russia, 2008г., 103 с.,ил.;
2. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / Под. ред. П.А. Бутырина. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
3. Беленький, Ю.М. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов / Ю.М. Беленький, Г.С. Зеленков, А.Г. Микеров. – Л.: ЛДНТП, 1987. – 28 с.
4. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных: пер. с англ. Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
5. Измерения в LabVIEW, Новосибирский государственный технический университет, 2003г., перевод 2006г., 148 с.
6. Овчинников, И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций / И.Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
7. Свириденко, П.А. Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие / П.А. Свириденко, А.Н. Шмелев. – М.: Высш. шк., 1970. – 392 с.
8. Суранов, А.Я. LabVIEW-8.2: справочник по функциям / А.Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

Стариков Альберт Николаевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир, ул. Горького, 87.

Старший преподаватель кафедры «Теплогасоснабжение, вентиляция и гидравлика»

Тел. 8-903-648-13-76

E-mail: albert@vlsu.ru

A.N. STARIKOV

TEST PROCESS OPTIMIZATION OF KINEMATICS, POWER AND ENERGY PARAMETERS IN ELECTRIC MOTORS OF DBM SERIES FOR DEFINITION OF FUNCTIONING RESERVES

In the paper the method for realization of electric motor tests as a complex procedure is submitted to. The test automation and optimization consist in the application of modern computer technologies. Data accessing is carried out at drive functioning and information accumulation is performed in a common database. Information processing, its monitoring and analysis are possible both, during tests, and after them. The approach shown here is universal and can be applied to various technical systems and their separate elements. The accent is focused up on complex science intensive objects.

Key words: complex tests, non-invasive torque motor, test board, virtual device.

BIBLIOGRAPHY

1. DIAdem, Obrabotka i analiz dannyh, generacija otchjotov, - M.: NI Russia, 2008g., 103 s.,il.;
2. Avtomatizacija fizicheskikh issledovanij i jeksperimenta: komp'juternye izmerenija i virtual'nye pribory na osnove LabVIEW 7 / Pod. red. P.A. Butyrina. – M.: DMK Press, 2005. – 264 s.
3. Belen'kij, Ju.M. Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnyh momentnyh privodov / Ju.M. Belen'kij, G.S. Zelenkov, A.G. Mikerov. – L.: LDNTP, 1987. – 28s.
4. Dzhonson, N. Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke: Metody obrabotki dannyh: per. s angl. N. Dzhonson, F. Lion. – M.: Mir, 1980. – 610 s.
5. Izmereniya v LabVIEW, Novosibirskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2003g., perevod 2006g., 148 s.
6. Ovchinnikov, I.E. Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaja i srednjaja mownost'): kurs lekcij / I.E. Ovchinnikov. – SPb.: KORONA-Vek, 2006. – 336 s.
7. Sviridenko, P.A. Osnovy avtomatizirovannogo jelektroprivoda: ucheb. posobie / P.A. Sviridenko, A.N. Shmelev. – M.: Vyssh. shk., 1970. – 392 s.
8. Suranov, A.Ja. LabVIEW-8.2: spravochnik po funkcijam / A.Ja. Suranov. – M.: DMK Press, 2007. – 536 s.

Starikov Albert Nickolaevich

Vladimir state university,

ul. Gorkogo, 87, Vladimir

Senior teacher of department “Heat gas supply, ventilation and hydraulics”

Tel. 8-903-648-13-76

E-mail: albert@vlsu.ru

М.П. ШИШКАРЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ

Исследован процесс работы адаптивных фрикционных муфт различных типов после срабатывания. Показано, что восстановление работоспособности муфт зависит от перепада величин коэффициентов трения покоя и скольжения, а также от числа пар трения и коэффициента усиления обратной связи.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, управляющее устройство, точность срабатывания, коэффициент усиления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

К особенностям адаптивных фрикционных муфт (АФМ) относится влияние обратной связи на перепад величин вращающих моментов при отсутствии буксования и при скольжении, что влияет на возможность перехода муфты из режима буксования в режим передачи номинальной нагрузки в машине.

Задача исследования – изучение влияния параметров АФМ, в том числе обратной связи, на величину перепада вращающих моментов при передаче номинальной нагрузки и при буксовании.

Решение задачи. Величина вращающего момента адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения (типа муфты Н.Д. Вернера) при всех ведущих парах трения вычисляется по формуле [1]:

$$T_{n,i} = zF_n R_{cp} \frac{f_{n,i}}{1 + zCf_{n,i}}, \quad (1)$$

где C – коэффициент усиления (КУ) обратной связи АФМ.

При буксовании АФМ передает вращающий момент:

$$T_{c,i} = zF_n R_{cp} \frac{f_{n,i}}{n + zCf_{n,i}}. \quad (2)$$

Положив $T_{n,i} = pT_{c,i}$ (p – коэффициент: $p > 1$), получим, с учетом формул (1) и (2):

$$p = \frac{n + zCf_{n,i}}{1 + zCf_{n,i}}. \quad (3)$$

Применив изложенный выше подход, запишем:

$$p = \beta_n. \quad (4)$$

Согласно выражению (3), величина p зависит от z и от КУ C . Анализ функции (3) показывает, что она является убывающей по аргументам z и C (по каждому в отдельности): первые производные по указанным аргументам соответственно равны:

$$D(p)_C = z f_{\min} \frac{1-n}{(1+zCf_{\min})^2},$$

$$D(p)_z = C f_{\min} \frac{1-n}{(1+zCf_{\min})^2},$$

и, очевидно, отрицательны (при $n > 1$).

Следовательно, увеличение (раздельное или совместное) параметров z и C приводит к уменьшению величины p и, соответственно, величины перепада между моментом трения покоя и моментом трения скольжения АФМ. Это позволяет выполнить условие (4) при заданной величине β_n . Аналогично изменяется величина коэффициента p при изменении коэффициента трения покоя $f_{n,i}$, поэтому максимальное значение p будет при значении f_{\min} .

Воспользовавшись равенством (4) в формуле (3), найдем требуемую величину КУ C

при заданной величине коэффициента β_n :

$$C = \frac{n - \beta_n}{z f_{\min} (\beta_n - 1)}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что при фиксированном значении β_n величина КУ C может быть уменьшена за счет увеличения z . Данный вывод представляется весьма важным, поскольку в динамическом режиме нагружения АФМ величина КУ имеет ограничение сверху по условию устойчивости движения привода. Точность срабатывания АФМ при этом не изменяется, поскольку постоянным остается так называемый приведенный КУ.

Вращающий момент базового варианта АФМ 2-го поколения равен [2]:

$$T_{n,i} = F_n R_{cp} f_{n,i} \frac{(z+1) - C f_{n,i}}{1 + (z-1) C f_{n,i}}, \quad (6)$$

при $z_1=1$ (z_1 – число пар трения дополнительной фрикционной группы).

Соответственно момент трения скольжения АФМ равен

$$T_{c,i} = F_n R_{cp} f_{n,i} \frac{(z+1)n - C f_{n,i}}{[n + (z-1) C f_{n,i}]n}. \quad (7)$$

По аналогии с изложенным выше и на основе соотношений (6) и (7) запишем:

$$p = \frac{[(z+1) - C f_{n,i}][n + (z-1) C f_{n,i}]n}{[(z+1)n - C f_{n,i}][1 + (z-1) C f_{n,i}]}. \quad (8)$$

Попутно заметим, что $p = 1/v_{д.с}$ (где $v_{д.с}$ – коэффициент, характеризующий действие предохранительной муфты при срабатывании [3]).

Особенностью рассматриваемой АФМ является ограничение величины КУ в виде $C \leq 1/f_{\max}$ (f_{\max} – максимальный коэффициент трения). В противном случае муфта на части интервала изменения коэффициента трения будет работать в неадаптивном режиме, что приведет к снижению точности срабатывания. В связи с этим, согласно соотношению (8), выделим в качестве переменных два параметра – z , $f_{n,i}$ и исследуем их влияние на величину p . Воспользуемся графическим способом, построив в координатных осях $p-z$ графики при различных значениях $f_{n,i}$. Графики построены при $C=1,25$ и $n=1,5$ (кривые 1 и 2). Прямая β_n отражает принятое в практике выбора предохранительных муфт значение, равное 1,25 [3].

Графики показывают, что величина p убывает с увеличением числа пар трения z , причем, условие $\beta_n > p$ выполняется при $z > 8$. С увеличением коэффициента трения $f_{n,i}$ величина коэффициента p уменьшается (кривые 3 и 4).

Следовательно, только многодисковый вариант АФМ 2-го поколения обеспечивает автоматическое восстановление собственной работоспособности после срабатывания.

АФМ с пружиной сжатия-кручения относится к муфтам 1-го поколения, однако она обладает переменным КУ, величина которого зависит от коэффициента трения и, следовательно, от передаваемой нагрузки [4]. Вращающий момент муфты вычисляется по формуле:

$$T_{n,i} = L \left\{ [A f_{n,i} + \pi D(i-2)] - \sqrt{[A f_{n,i} + \pi D(i-2)]^2 - B f_{n,i}} \right\}, \quad (9)$$

где A , B и L – константы, зависящие от геометрических параметров муфты и пружины сжатия-кручения, а также от физико-механических характеристик материала пружины [4].

С учетом формулы (9) величина коэффициента p вычисляется по соотношению:

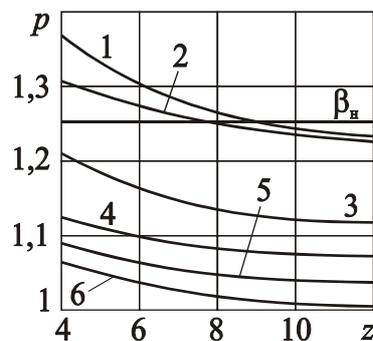


Рисунок 1 – Графики зависимости $p(z)$ для различных типов предохранительных фрикционных муфт

$$p = \frac{n \left\{ [Af_{n,i} + \pi D(i-2)] - \sqrt{[Af_{n,i} + \pi D(i-2)]^2 - Bf_{n,i}} \right\}}{[Af_{n,i} + \pi Dn(i-2)] - \sqrt{[Af_{n,i} + \pi Dn(i-2)]^2 - Bnf_{n,i}}}. \quad (10)$$

В формуле (10) величины A и B зависят от числа пар трения z , поэтому функцию $p(z)$ можно представить графически. График показывает (кривая 5), что величина коэффициента p АФМ с пружиной сжатия-кручения несколько меньше, чем у АФМ Н.Д. Вернера (кривая 1). Это объясняется тем, что АФМ с пружиной сжатия-кручения имеет переменный КУ, величина которого возрастает по мере увеличения передаваемой нагрузки. Поэтому в режиме буксования муфты величина КУ уменьшается, что, согласно выражению (3), приводит к уменьшению величины коэффициента p .

Увеличение коэффициента трения $f_{n,i}$ в АФМ с пружиной сжатия-кручения приводит к уменьшению величины коэффициента p (кривая 6).

Аналогичная картина наблюдается у не исследованных в данной работе АФМ с пружинами сжатия-изгиба [5] и у АФМ с V-образными упругими лепестковыми элементами [6].

Выводы. 1. В АФМ перепад вращающих моментов при отсутствии буксования и при скольжении, зависит от величины коэффициента трения. Максимальный перепад соответствует минимальному значению коэффициента трения. 2. Перепад вращающих моментов в АФМ зависит от числа пар трения фрикционной группы и коэффициента усиления обратной связи. Перепад вращающих моментов уменьшается с увеличением числа пар трения и КУ. 3. Перепад вращающих моментов АФМ с переменным КУ меньше, чем у АФМ с постоянным КУ вследствие уменьшения при срабатывании не только коэффициента трения, но и КУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко, С.К. Предохранительные муфты / С.К. Дьяченко, Н.Ф. Киркач. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
2. А. с. 1430633 СССР, МПК⁴ F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарев (СССР). – № 4048607/25–27; Заявлено 26.02.86; Опубл. 15.10.88. Бюл. № 38. – 3 с.: ил.
3. Поляков, В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.
4. А. с. 1295064 СССР, МПК⁴ F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарев (СССР). – № 3968197/25–27; Заявлено 24.10.85; Опубл. 07.03.87. Бюл. № 9. – 3 с.: ил.
5. Шишкарев, М.П. Задача о продольно-поперечном изгибе цилиндрической винтовой пружины в приложении / М.П. Шишкарев // Машиностроение: интеграция отраслевой и вузовской науки: материалы XII науч.-техн. конф. – Ростов н/Д, 1998. – С. 58–62.
6. Шишкарев, М.П. Синтез адаптивной фрикционной муфты с переменным коэффициентом усиления управляющего устройства / М.П. Шишкарев // Интеграция отраслевой и вузовской науки: проблемы современного машиностроения: междунар. науч.-техн. конф.: тез. докл. – Ростов н/Д, 2000. – С. 107–109.

Шишкарев Михаил Павлович

Ростовский-на-Дону институт энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону

Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Информационное обеспечение автоматизированного производства»

Тел. (863-2) 52-41-35

E-mail: Shishkarev@tam.rgashm.ru

M.P. SHISHKARYOV

RESEARCH OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCH ABRASION

The process of operation of adaptive frictional clutches of various types after operation is examined. It is shown, that of working capacity restoration in clutches depends on the difference of values of a coefficient of static friction and that a slip factor, and also on the number of friction pairs and a feedback amplification factor.

Key words: adaptive frictional clutch, control device, accuracy of operation, amplification factor.

BIBLIOGRAPHY

1. D'jachenko, S.K. Predohranitel'nye mufty / S.K. D'jachenko, N.F. Kirkach. Kiev: Gostehizdat USSR, 1962. 122 s.
2. A. s. 1430633 SSSR, MPK4 F 16 D 7/02. Predohranitel'naja frikcionnaja mufta / M.P. Shishkarev (SSSR). – № 4048607/2527; Zajavleno 26.02.86; Opubl. 15.10.88. Bjul. № 38. – 3 s.: il.
3. Poljakov, V.S. Spravochnik po muftam / V.S. Poljakov, I.D. Barbash, O.A. Rjahovskij. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1974. 352 s.
4. A. s. 1295064 SSSR, MPK4 F 16 D 7/02. Predohranitel'naja frikcionnaja mufta / M.P. Shishkarev (SSSR). – № 3968197/2527; Zajavleno 24.10.85; Opubl. 07.03.87. Bjul. № 9. – 3 s.: il.
5. Shishkarev, M.P. Zadacha o prodol'no-poperechnom izgibe cilindricheskoj vintovoj pruzhiny v pri-lozhenii / M.P. Shishkarev // Mashinostroenie: integracija otraslevoj i vuzovskoj nauki: materialy III na-uch.-tehn. konf. – Rostov n/D, 1998. – S. 58–62.
6. Shishkarev, M.P. Sintez adaptivnoj frikcionnoj mufty s peremennym koeficientom usilenija upravljajuwego ustrojstva / M.P. Shishkarev // Integracija otraslevoj i vuzovskoj nauki: problemy sovremen-nogo mashinostroenija: mezhdunar. nauch-tehn. konf.: tez. dokl. – Rostov n/D, 2000. – S. 107–109.

Shishkaryov Michail Pavlovich

Rostov-on-Don institute of energetics and mechanical engineering of Don state technical university, Rostov-on-Don
Doctor of technical science, associate professor, head of department “Information support of automation industry”
Tel. 863-2-52-41-35
E-mail: Shishkarev@tam.rgashm.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.914

С.К. АМБРОСИМОВ, А.Н. БОЛЬШАКОВ

НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ ВЫХОДЕ ЕГО ИЗ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ

В статье представлены теоретические исследования напряжений, действующих на режущую кромку и возникающих от действия изгибающего момента при выходе зуба из зоны обработки.

Ключевые слова: режущий клин, зона обработки, обрабатываемая поверхность.

На режущий клин в процессе работы действуют нормальные и касательные сжимающие напряжения. Эти напряжения увеличиваются при выходе режущего клина из зоны обработки, что может отрицательно сказываться на работе режущего клина. На характер изменения этих напряжений оказывает влияние большое число технологических и физических факторов, таких как толщина срезаемого слоя, скорость резания, передний угол γ , твёрдость обрабатываемого материала и другие физические характеристики обрабатываемого материала. Эффект разгрузочного удара заключается в том, что при выходе режущего клина из зоны обработки, срезаемый слой теряет опору и процесс резания заменяется пластической деформацией. При этом угол наклона условной плоскости сдвига начинает уменьшаться, что и приводит к увеличению сжимающих напряжений. Описанный эффект разгрузочного удара заключается не только в увеличении сжимающих напряжений при выходе режущего клина из зоны обработки, также изменяются по величине и знаку напряжения, возникающие в нём (режущем клине) от действия изгибающего момента при его выходе из зоны обработки [1].

Для подробного рассмотрения и описания процессов возникновения и изменения напряжений, возникающих от действия изгибающего момента на режущий клин, необходимо рассматривать силы, действующие на переднюю и заднюю поверхности режущего клина.

Далее будет рассматривается определение параметров l_3 и h_3 (рис 1) контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью режущего клина.

В процессе резания на обрабатываемый металл, расположенный в зоне при вершине O режущего клина, в направлении размерной линии h действует сжимающее напряжение σ_h . Как считает автор работы [2], при строгании размер h равен расстоянию от вершины режущего клина до нижней опорной поверхности заготовки, а при точении целесообразно считать, что параметры процесса выбраны таким образом, чтобы практически отсутствовал изгиб оси заготовки. В этом случае размер h можно измерять до недеформированной оси, т.е. определять по формуле $h = d/2$, где d – диаметр обточенной поверхности заготовки.

В результате действия напряжения σ_h во время деформации слева от точки O происходит упругое сжатие материального отрезка h . После того как данный материальный отрезок переместится правее вершины режущего клина O , т.е. выйдет из зоны резания, начнётся его упругая разгрузка, которая, как известно, подчиняется закону Гука. Величина упругой деформации разгрузки определяется равенством

$$\varepsilon = \sigma_h/E,$$

где E – модуль упругости материала обрабатываемой заготовки.

Величина полного восстановления длины h отрезка определяется формулой:

$$h_3 = \varepsilon \cdot h = \frac{|\sigma_h|}{E} \cdot h. \quad (1)$$

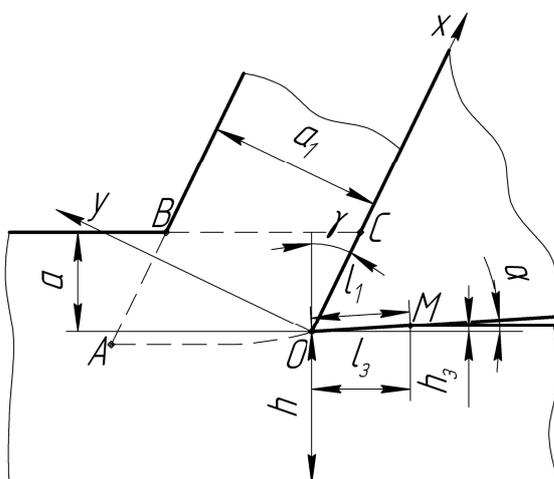


Рисунок 1 – Схема к определению параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью режущего клина

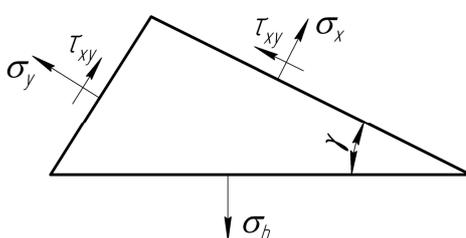


Рисунок 2 – К определению сжимающего напряжения σ_h

Очевидно, что горизонтальная проекция l_3 длины поверхности контакта обработанной части заготовки с задней поверхностью режущего клина определяется выражением

$$l_3 = h_3 / \operatorname{tg} \alpha . \quad (2)$$

Для определения сжимающих напряжений σ_h автор [2] выделяет в очаге пластической деформации вблизи точки O элементарную треугольную призму (рис 2), для которой известно следующее общетеоретическое соотношение:

$$\sigma_h = \sigma_x \cdot \cos^2 \gamma + \sigma_y \cdot \sin^2 \gamma + \tau_{xy} \cdot \sin 2\gamma . \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) при $x = y = 0$ выражения для $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

$$\sigma_x = -1.155 \cdot \sigma_s \cdot \left[\mu_1 \cdot \frac{l}{a_1} + (0.5 + \mu) \cdot \left(\frac{u \cdot a}{a_1} - \frac{x}{a_1} \right) \right] \quad (4)$$

$$\sigma_y = -1.155 \cdot \sigma_s \cdot \left[1 + \mu_1 \cdot \frac{l}{a_1} + (0.5 + \mu) \cdot \left(\frac{u \cdot a}{a_1} - \frac{x}{a_1} \right) \right] \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = 1.155 \cdot \sigma_s \cdot \left[\mu - \frac{(0.5 + \mu)}{a_1} \cdot y \right], \quad (6)$$

учитывая равенства

$$l = a_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + u \cdot a \cdot \left(\frac{1}{u \cdot \cos \gamma} - 1 \right) \quad (7)$$

$$a_1 = K \cdot a \quad (8)$$

и пренебрегая членом

$$c = \frac{\mu \cdot u}{K} \cdot \left(\frac{1}{u \cdot \cos \gamma} - 1 \right), \quad (9)$$

получим:

$$\sigma_h = -1.155 \cdot \sigma_s \cdot \left[\sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0.5 + \mu) \cdot u}{K} - \mu \cdot \sin 2\gamma \right]. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) в формулу (1), окончательно найдём:

$$h_3 = 1.155 \cdot \frac{\sigma_s}{E} \cdot h \cdot \left[\sin^2 \gamma + \mu \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0.5 + \mu) \cdot u}{K} - \mu \cdot \sin 2\gamma \right], \quad (11)$$

где σ_s – предел текучести,

γ – передний угол,

μ – коэффициент трения,

K – коэффициент усадки стружки.

Из формулы (1) следует, что с увеличением нормальных напряжений действующих в точке O , увеличивается и величина полного восстановления, а так же увеличивается длина контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью режущего клина [2].

Силы, действующие на заднюю поверхность режущего клина со стороны обработанной поверхности заготовки, делятся на нормальные и касательные. И те, и другие являются распределёнными по длине контакта задней поверхности и обработанной поверхностью заготовки.

Для определения закона их распределения рассмотрим (рис 3). В точке O , нормальные напряжения имеют максимальное значение. Они постепенно убывают в направлении от точки O к точке M , в которой прекращается контакт обработанной поверхности заготовки и задней поверхности режущего клина. В связи с этим можно говорить о том, что напряжения, действующие на заднюю поверхность в точке M равны нулю. Из этого вытекает, что нормальная распределённая нагрузка q_{N_3} имеет закон распределения $q_{N_3} = q_{\max} \cdot (1 - \frac{z_2}{l_1})$. Среднее

значение нормальных напряжений можно определить по выражению:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{N_3}{l_1 \cdot b}, \quad (12)$$

где l_1 и b – длина и ширина контакта задней поверхности с обработанной поверхностью заготовки соответственно.

Учитывая, что $N_3 = \frac{q_{\max} \cdot l_1}{2}$ (13) и подставляя выражение (13) в (12) получим:

$$q_{\max} = \sigma_{\max} \cdot b, \text{ длина контакта } l_1 \text{ определяется по формуле } l_1 = l_3 / \cos \alpha. \quad (14)$$

Касательная распределённая нагрузка определяется из выражения $\mu_3 = \frac{q_{\tau_3}}{q_{N_3}}$, откуда

$q_{\tau_3} = \mu_3 \cdot q_{N_3}$, (15) она имеет тот же закон распределения, что и нормальная нагрузка

$$q_{\tau_3} = \mu_3 \cdot q_{\max} \cdot (1 - \frac{z_2}{l_1}). \quad (16)$$

Распределённые нагрузки, действующие на переднюю поверхность, имеют тот же закон распределения, что и нагрузки, действующие на заднюю поверхность:

$$q_{N_{пер}} = q_{\max} \cdot (1 - \frac{z_1}{C}) \text{ и } q_{\tau_{пер}} = \mu \cdot q_{\max} \cdot (1 - \frac{z_1}{C}),$$

где C – длина контакта стружки с передней поверхностью режущего клина,

μ – коэффициент трения между стружкой и передней поверхностью на участке контакта длиной C .

Расположение распределённых нагрузок, действующих на режущий клин приведено на рисунке 3. Оси z_1 и z_2 проведены в нормальной секущей плоскости к главной режущей кромке из точки O параллельно передней и задней поверхностям режущего клина соответственно.

Для определения действующего изгибающего момента на вершину режущего клина необходимо рассмотреть распределённые нагрузки, действующие на переднюю и заднюю

поверхности необходимо провести центральную ось OZ , проходящую через центр масс режущего клина и спроецировать распределённые нагрузки на эту ось (рис. 4).

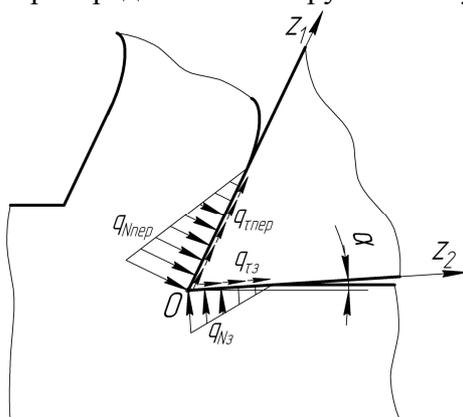


Рисунок 3 – Силовая схема распределённых нагрузок, действующих на переднюю и заднюю поверхности режущего клина со стороны заготовки

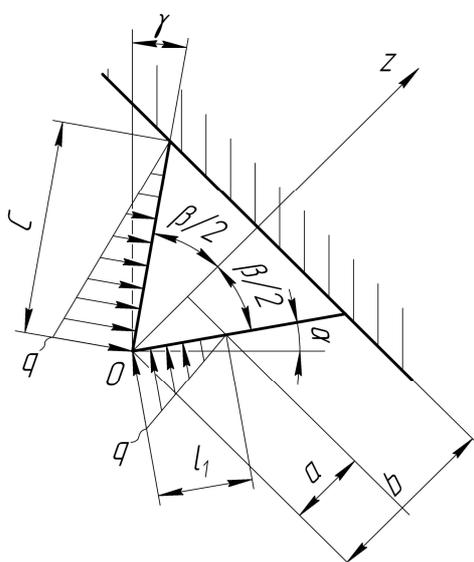


Рисунок 4 – Схема для расчета изгибающего момента, действующего на режущий клин

Проекции распределённых нагрузок можно записать в виде:

$$q_{Nпер} = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \cos(\beta/2); \quad (17) \quad q_{трпер} = \mu \cdot q_{max} \cdot \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \sin(\beta/2); \quad (18)$$

$$q_{Nзад} = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{z}{a}\right) \cdot \cos(\beta/2); \quad (19) \quad q_{трзад} = \mu \cdot q_{max} \cdot \left(1 - \frac{z}{a}\right) \cdot \sin(\beta/2); \quad (20)$$

$$b = C \cdot \cos(\beta/2); \quad a = l_1 \cdot \cos(\beta/2); \quad \beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma),$$

где a и b – длина первого участка и общая длина действия распределённой нагрузки на режущий клин в проекции на ось Oz соответственно,

β – угол заострения,

μ – коэффициент трения.

Изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_x = \int Q dz + Q_0$$

$$Q = \int q_N(z) dz$$

где M_x – изгибающий момент,

Q – поперечная сила.

Для упрощения выражения производится замена

$$\begin{aligned}(\cos(\beta/2) - \mu \cdot \sin(\beta/2)) &= k_1 \\ (\cos(\beta/2) - \mu_3 \cdot \sin(\beta/2)) &= k_2 \\ q_{\max} &= q\end{aligned}$$

Тогда:

Для первого участка:

$$\begin{aligned}Q &= -q \cdot \left[k_1 \cdot \left(z - \frac{z^2}{2 \cdot b} \right) - k_2 \cdot \left(z - \frac{z^2}{2 \cdot a} \right) \right] \\ M_x &= -q \cdot \left[k_1 \cdot \left(\frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6 \cdot b} \right) - k_2 \cdot \left(\frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6 \cdot a} \right) \right].\end{aligned}\tag{21}$$

Для второго участка:

$$\begin{aligned}Q &= -q \cdot k_1 \cdot \left[1 - \frac{a}{b} \right] \cdot \left(z - \frac{z^2}{2 \cdot (b-a)} \right) - q \cdot k_1 \cdot \left[1 - \frac{a}{b} \right] \cdot a - \frac{q \cdot k_1 \cdot a^2}{2 \cdot b} + \frac{q \cdot k_2 \cdot a}{2} \\ M_x &= -q \cdot k_1 \cdot \left[1 - \frac{a}{b} \right] \cdot \left(\frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6 \cdot (b-a)} \right) - q \cdot k_1 \cdot \left[1 - \frac{a}{b} \right] \cdot a \cdot \left(\frac{a}{2} + z \right) - \frac{q \cdot k_1 \cdot a^2}{2 \cdot b} \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{3} + z \right) + \\ &+ \frac{q \cdot k_2 \cdot a}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{3} + z \right)\end{aligned}\tag{22}$$

Напряжения, возникающие в режущем клине, при его изгибе под действием распределённых нагрузок определяются по формуле:

$$\sigma(z) = \frac{M_x(z)}{J_x(z)} \cdot y, [МПа],\tag{23}$$

где $J_x(z)$ – момент инерции поперечного сечения, y расстояние от центральной оси, z – отсчитывается от главной оси Oz .

$$J_x(z) = \frac{b \cdot h^3(z)}{12},\tag{24}$$

где b – ширина режущего клина;

$h(z)$ – высота сечения, нормального к оси OZ [3].

Высоту сечения можно определить по формуле

$$h(z) = 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)\tag{25}$$

Суммарные касательные напряжения, действующие на переднюю поверхность режущего клина можно определить по формуле

$$\tau_{\text{сум}} = -\tau_{\text{пер}} - \sigma_{\text{изг}} \cdot \cos(\beta/2)\tag{26}$$

Знаки «минус» учитывают направление напряжений: $\tau_{\text{пер}}$ – сжимающие напряжения, а $\sigma_{\text{изг}}$ – растягивающие напряжения, возникающие из-за изгиба режущего клина.

То есть режущий клин имеет сложную схему нагружения с одновременным сжатием и изгибом. Сжимающие напряжения рассчитаны по методике приведённой в работе [1].

При выходе режущего клина из зоны обработки изгибающий момент, действующий на режущий клин, меняет свой знак, что меняет направление изгиба режущего клина. При этом напряжения $\sigma_{\text{изг}}$ меняют свой знак и становятся сжимающими. Это приводит к увеличению суммарных касательных напряжений см. формула (26).

Наблюдения показывают, что в возможны появления трещин на режущем клине, имеющие различную ориентировку: поперечные, продольные и наклонные.

Расположение и направление этих трещин указывает причину, их вызывающую. Вертикальные трещины появляются в зоне наибольшего изгибающего момента (касательных напряжений). Горизонтальные трещины возникают из-за действия нормальных напряжений.

Но возможен и третий случай, когда причиной повреждения являются наклонные трещины, занимающие промежуточное положение между краем режущего клина и осью. Их появление нельзя объяснить действием нормальных или касательных напряжений [4], [5].

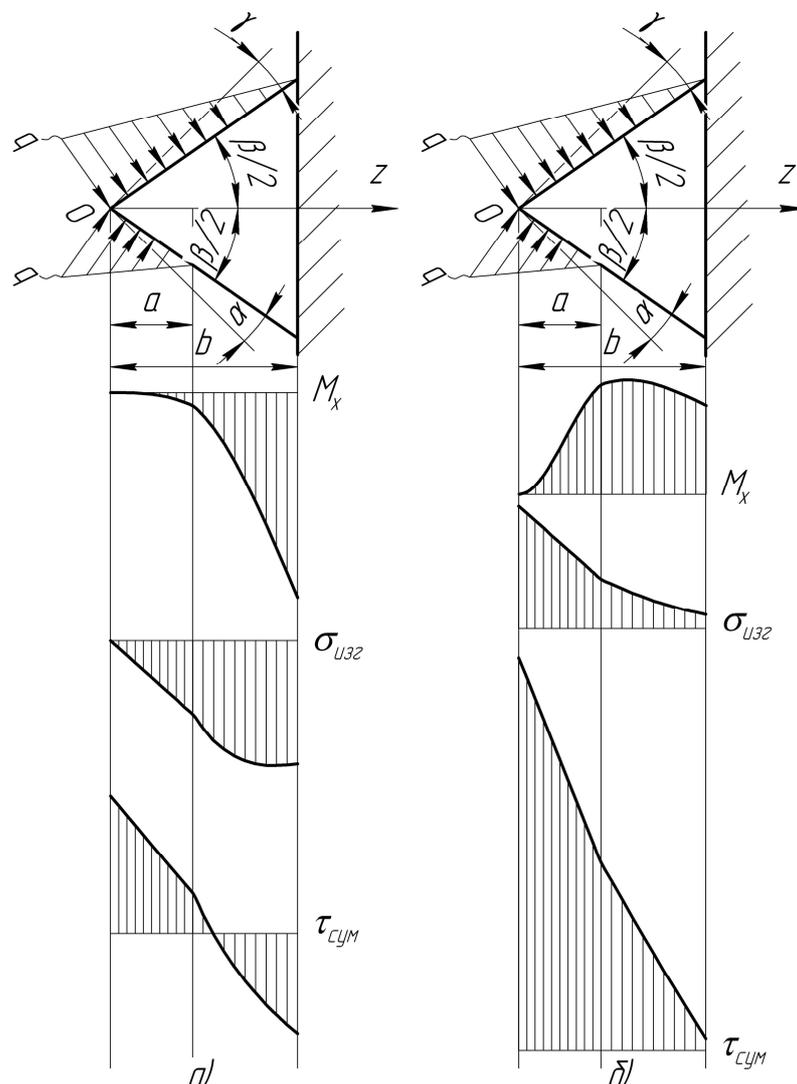


Рисунок 5 – Эпюры изгибающих моментов, нормальных напряжений вызванных ими и суммарных касательных напряжений, действующих на переднюю поверхность

a – режущий клин находится далеко от выхода из зоны обработки;
б – при выходе режущего клина из зоны обработки

На эпюрах, представленных на рисунке 5 максимальный изгибающий момент M_x для случая, когда режущий клин находится далеко от выхода из зоны обработки (рис. 5а) на несколько порядков больше. Максимальные значения нормальных напряжений, вызванных изгибающим моментом, в обоих случаях имеют практически одинаковые значения.

Максимальное значение суммарных касательных напряжений, действующих на переднюю поверхность, при выходе режущего клина из зоны обработки в 2 – 4 раза выше, чем в случае, когда режущий клин находится далеко от выхода из зоны обработки. При этом максимальное значение касательных напряжений при выходе режущего клина из зоны обработки располагаются на его вершине. Эти напряжения могут привести к сколу или его разрушению именно возле его вершины, что иногда наблюдается на практике.

ВЫВОДЫ

На основании предположения о уменьшении угла наклона условной плоскости сдвига при выходе зуба из зоны обработки за счёт возникновения пластической деформации на тор-

це заготовки от Φ до некоторого значения близкого к нулю получены зависимости изменения касательных и нормальных напряжений у вершины режущей кромки зуба. Рассмотрена схема нагружения режущего клина в процессе резания, а также сложное напряжённое состояние на передней поверхности режущего клина (одновременное сжатие и изгиб) в динамике процесса резания на выходе из зоны резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбросимов, С.К. Исследование динамики процесса резания при выходе зуба из зоны обработки при фрезеровании / С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010, №1/279 (592). – С.29 – 34.
2. Воронцов, А.Л. Математическое описание стружкообразования, пульсации силы резания, а также параметров контакта заготовки с задней поверхностью резца [Текст] / А.Л. Воронцов// Производство проката. – 2008, №5. – С.2 – 8.
3. Ильюшин, А.А. Сопrotивление материалов. [Текст] / А.А. Ильюшин, В.С. Ленский. – М.: Физматгиз, 1959. – 365 с.
4. Зозуля, В.В. Механика материалов [Текст] / В.В. Зозуля, А.В. Мартыненко, А.Н. Лукин. – Харьков: Изд-во Национ. ун-та внутр. дел, 2001. – 404 с.
5. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия [Текст] / К. Джонсон; Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с., ил.

Амбросимов Сергей Константинович

Липецкий государственный технический университет

Доктор технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (4742) 74-39-36

Большаков Алексей Николаевич

Липецкий государственный технический университет

Аспирант

Тел. 8-951-305-36-62

S.K. AMBROSIMOV, A.N. BOLSHAKOV

STRESS OF WEDGE AT ITS LEAVING A CUTTING AREA

The article presents theoretical researches of stresses affecting a cutting edge and arising from the action of a bending moment on leaving a cutting area by a tooth.

Key words: cutting wedge, cutting area, work surface.

BIBLIOGRAPHY

1. Ambrosimov, S.K. Issledovanie dinamiki processa rezanija pri vyhode zuba iz zony obrabotki pri frezerovanii / S.K. Ambrosimov, A.N. Bol'shakov// Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii. – 2010, №1/279 (592). – S.29 – 34.
2. Voroncov, A.L. Matematicheskoe opisanie struzhkoobrazovaniya, pul'sacii sily rezanija, a takzhe parametrov kontakta zagotovki s zadnej poverhnost'ju rezca [Tekst] / A.L. Voroncov// Proizvodstvo prokata. – 2008, №5. – S.2 – 8.
3. Il'jushin, A.A. Soprotivlenie materialov. [Tekst] / A.A. Il'jushin, V.S. Lenskij. – M.: Fizmatgiz, 1959. – 365 s.
4. Zozulja, V.V. Mehanika materialov [Tekst] / V.V. Zozulja, A.V. Martynenko, A.N. Lukin. – Har'kov: Izd-vo Nacion. un-ta vnutr. del, 2001. – 404 s.
5. Dzhonson, K. Mehanika kontaktnogo vzaimodejstvija [Tekst] / K. Dzhonson; Per. s angl. – M.: Mir, 1989. – 510 s., il.

Ambrosimov Sergey Konstantinovich

Lipetsk state technical university

Doctor of technical science, associate professor of department “Mechanical engineering technology”

Tel. 4742-74-39-36

Bolshakov Aleksey Nickolaevich

Lipetsk state technical university

Post-graduate student

Tel. 8-951-305-36-62

УДК 621.9.048.6 :621.794

В.В. ИВАНОВ, М.Ф. СЕЛЕМЕНЕВ, Ю.В. МАРЧЕНКО

ФОРМИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

Дан краткий обзор вибрационных механохимических покрытий. Примеры практического применения твердой смазки на основе дисульфида молибдена образованные в условиях виброобработки. Приведена схема модели формирования покрытия дисульфид молибдена.

Ключевые слова: комбинированные методы обработки, вибрационная обработка, вибрационные механохимические покрытия, твердые смазки.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники, внедрение нанотехнологий в создание новых машин и агрегатов требует разработки новых технологических процессов, обеспечивающих качество, высокие эксплуатационные свойства и товарный вид выпускаемой продукции, способной конкурировать в условиях рыночной экономики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Важным условием решения этих задач является совершенствование и развитие финишной обработки, в частности нанесения покрытий.

Одним из эффективных методов обработки, позволяющих комбинировать методы механической обработки с одновременным нанесением покрытий, являются вибрационная обработка деталей в различных технологических средах с использованием колебаний различного спектра. При этом используется эффект совместного воздействия механической энергии и химических процессов в различном их сочетании.

Вибрационная обработка обеспечивает изменение физико-химических свойств поверхностных слоёв обрабатываемых деталей и характеризуется высокой производительностью. Одним из перспективных направлений развития вибрационной обработки является нанесение механохимических покрытий. К ним относятся: вибрационное механохимическое цинкование, (ВиМХЦ), вибрационное механохимическое оксидирование (ВиМХО), вибрационное механохимическое нанесение твердой смазки дисульфид молибдена (ВиМХТС M_0S_2) и др. Огромный интерес представляют (ВиМХТС M_0S_2) так как роль твердых смазок в общей проблеме повышения надежности и долговечности машин и механизмов трудно переоценить. Твердые смазки исключительно широко применяются в различных отраслях промышленности, однако их возможности далеко еще не исчерпаны.

Публикации о применении дисульфидов, селенидов, теллуридов, молибдена, дисульфидов вольфрама, тантала, титана и других металлов в качестве твердых смазок появились давно но наибольший интерес получил дисульфид молибдена (M_0S_2) и вопросы его применения подверглись всестороннему изучению.

По классификации предложенной Кемпбелом M_0S_2 относится к группе твердых смазок имеющих слоистое строение. В эту группу смазок входит также графит, слюда, тальк, нитрид бора, стеарат-цинка и др.

Кристаллическая решетка твердых смазок имеет слоистую структуру. Атомы каждого слоя связаны между собой прочными химическими связями, отдельные слои связаны между собой слабыми молекулярными силами, что обеспечивает легкость скольжения по плоскости спайности. Толщина одного элементарного слоя M_0S_2 равна 6,25 А. Пленка дисульфида молибдена толщиной 0,025 мкм состоит из 40 слоев с 38 плоскостями скольжения между ними. Высокая адгезия дисульфида молибдена к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образуемыми атомами серы с металлом; строение кристаллической решетки обеспечивает наличие важных для смазочных материалов высоких адгезионных свойств. Дисульфид молибдена имеет гексагональную слоистую решетку в форме призматического шестигранника (рис.1).

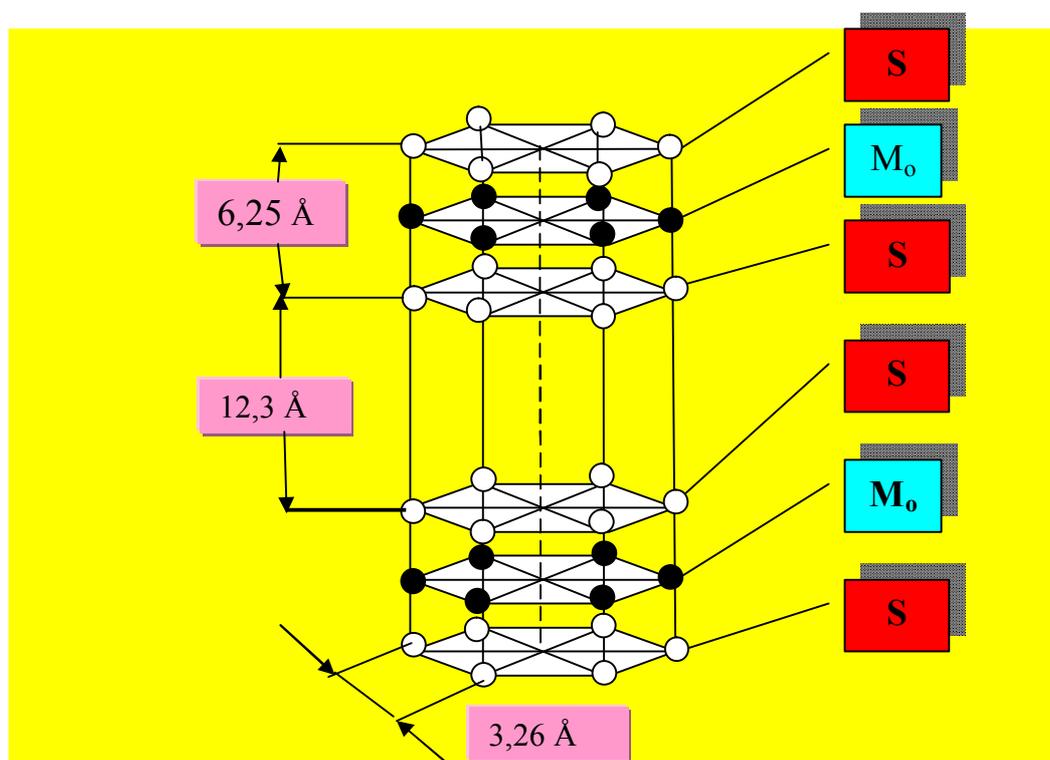


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка дисульфида молибдена

Параметры кристаллической решетки ширина 3,26Å высота 12,3 Å толщина одного элементарного слоя равна 6.25 Å

Его молекулярный вес-160,7; удельный вес-4,8; твердость по Моосу 1-1,5. Дисульфид молибдена устойчив к температуре минус 80⁰С до плюс 450⁰С, температура плавления-1185⁰С. Допустимая динамическая нагрузка более 1500 кг/см², а статическая — свыше 30 000 кг/см². Пленка дисульфида молибдена толщиной 1 мкм. содержит 1630 слоев или 1631 скользящую поверхность. Наличие слоев двух различных атомов в структуре дисульфида молибдена создает условия легкого скольжения пластинок.[3]

Кристаллы дисульфида молибдена жирные на ощупь, имеют голубовато-серый цвет, металлический блеск.

Коэффициент трения уменьшается при увеличении нагрузки, что связано с увеличением параллельности слоев. После приработки коэффициент трения стабилизируется. Соединение между атомами молибдена и серы очень прочное, чем объясняется повышенная устойчивость этого соединения к деформации и его исключительная химическая и термическая стабильность. Дисульфид молибдена устойчивости почти против всех растворителей. Являясь антикоррозионным покрытием, дисульфид молибдена препятствует окислению деталей под воздействием влаги, паров, газов.

Нанотубулярные дисульфиды молибдена в этом отношении обладают еще более перспективными характеристиками. Их можно использовать не только в подшипниках или как присадку к смазочным маслам: еще одна возможность – использование в качестве смазки при хирургических операциях с участием пунктирующих наконечников или катетеров. В этом случае хирургический инструмент проникает в человеческий организм «как по маслу», без боли, по крайней мере, с использованием меньшей дозы анестетика. Вторая важная область практического применения – устройства наноионики и создание новых поколений литий-ионных аккумуляторов. Этому благоприятствует слоистая структура и большая площадь поверхности нанотубуленов дисульфидов молибдена и вольфрама. В такую структуру между слоями могут обратимо, без разрушения, входить маленькие ионы лития, при этом по слоям нанотрубки за счет изменения степени окисления вольфрама или молибдена могут «путешествовать» и электроны. В результате получается отличный электродный материал. Доказана также эффективность применения сульфидных нанотубуленов в качестве катализа-

торов – специфических веществ, в тысячи раз ускоряющие химические превращения - такие материалы незаменимы в тонком органическом синтезе.

Совокупность исключительных свойств дисульфида молибдена позволяет применять его как основу самосвязующего средства при решении разнообразных проблем вибрационных механохимических покрытий. В АТИ ДГТУ проводились исследования по нанесению MoS_2 в условиях вибрационной обработки. В качестве оборудования применялась вибрационная установка УВГ 4-10 с частотой колебания 15-33 гц и амплитудой колебания 1-5 мм. С целью обеспечения равномерного распределения порошка в объеме камеры применялась рабочая среда стальные шары диаметром от 2 до 5 мм. и тонкодисперсный дисульфид молибдена марки МВЧ-1, размер частицы 1-7 мкм. Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении износостойкости трущихся пар, от 4 до 20 раз в зависимости от условий эксплуатации. В процессе исследований отмечалось упругое и пластическое деформирование поверхностного слоя в зоне контакта рабочей среды с поверхностью обрабатываемой детали. Также имеет место физическая адсорбция частиц MoS_2 к металлической поверхности за счет сил Ван-дер Вальса, и механического внедрения в результате воздействия рабочей среды.

В работах Бабичева А.П. Рысовой Т.Н разработана схема модели формирования ВиМХП на основе дисульфид молибдена (рис.2.а.б.в.).[1,2,4]

1. механический контакт и адсорбция частиц MoS_2 . В момент приложения внешней нагрузки, благодаря силе соударения шара с поверхностного обрабатываемого материала, происходит упругая, пластическая и упруго-пластическая деформация в зоне контакта. За счет сближения наносимого покрытия с деталью происходит адсорбции частиц на поверхности металла (рис.2.а.).

2. активация поверхностного слоя металла. Активация поверхности осуществляется в результате пластического деформирования и увеличения плотности дислокаций, разрушения окислых пленок и образования участков поверхности, увеличения площади поверхности (рис.2.а.).

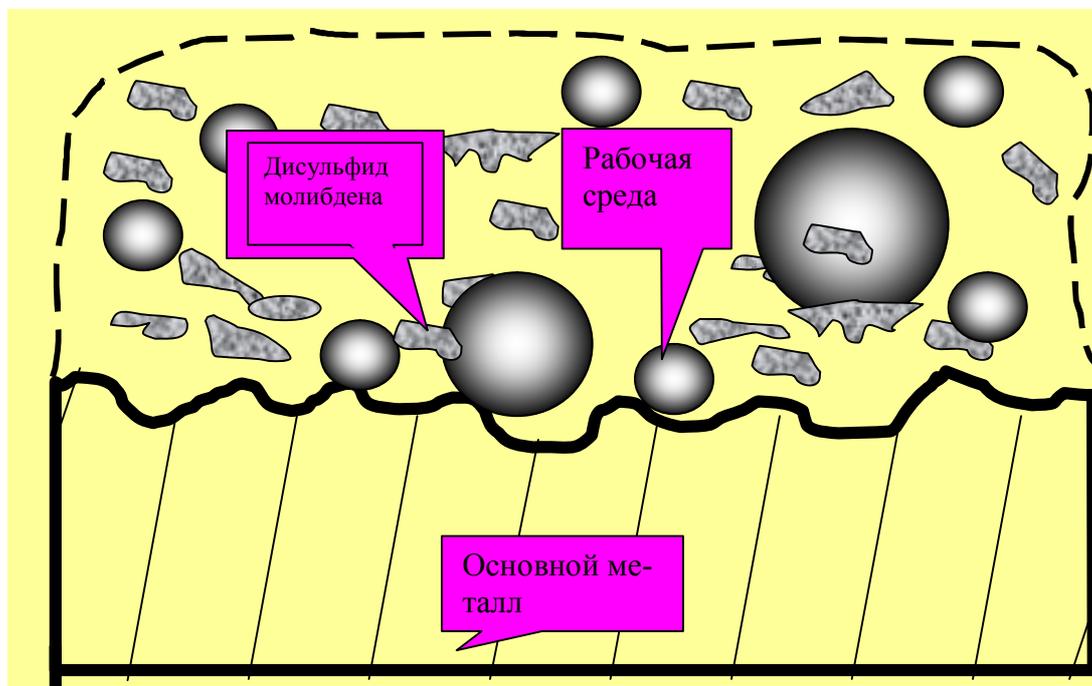


Рисунок 2 а – Модель формирования ВиМХП на основе дисульфида молибдена – адсорбция частиц на поверхности металла

3. образование граничного слоя. Этот этап осуществляется вследствие размельчения кристаллов MoS_2 разрушения ими окислых пленок во впадинах микрорельефа, внедрения частиц порошка и адсорбции их к поверхностному слою активизирующего металла (рис.2.б).

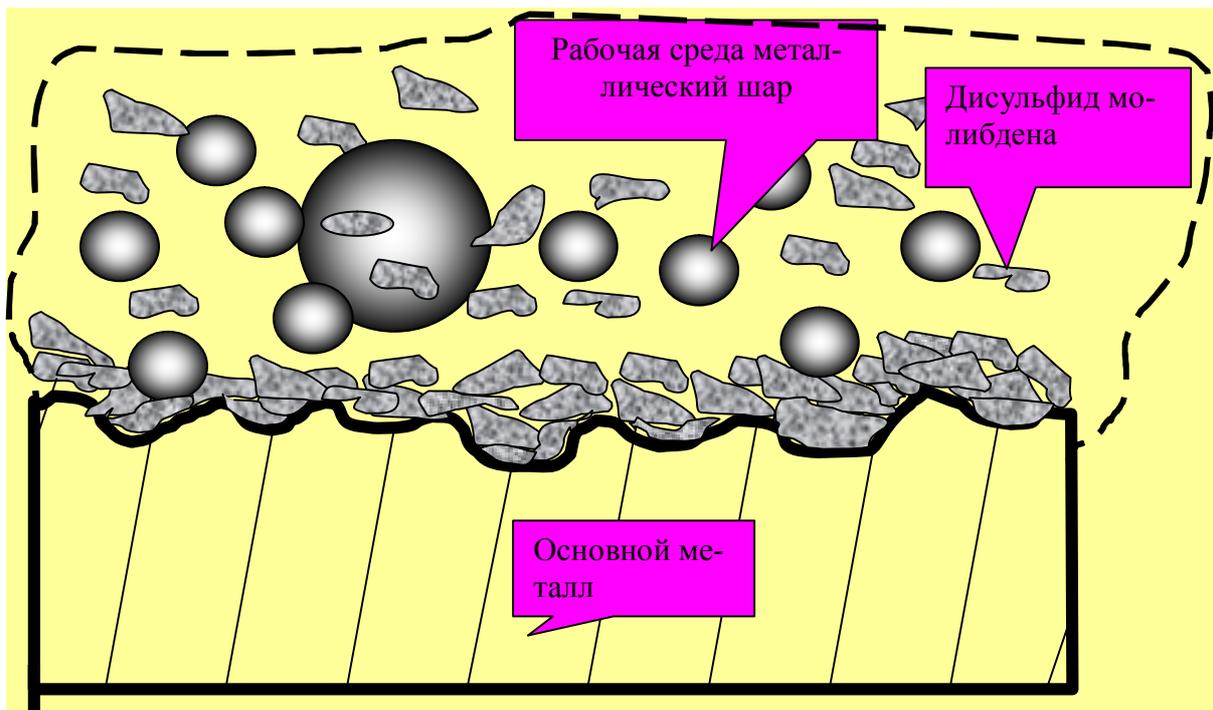


Рисунок 2 б – Модель формирования ВиМХП на основе дисульфид молибдена – внедрения частиц порошка и адсорбции их к поверхностному слою активизирующего металла

4. образование слоя смазки. Этот этап характеризуется утолщением частиц нанесенного покрытия, размельчением кристаллов, слипанием их друг с другом, образованием сплошного слоя смазки (рис.2.в.).

5. формирование поверхностного слоя покрытия. В результате скольжения частиц рабочей среды относительно образуемой поверхности частиц порошка ориентируется базовыми плоскостями параллельно поверхности трения (рис.2.в.).

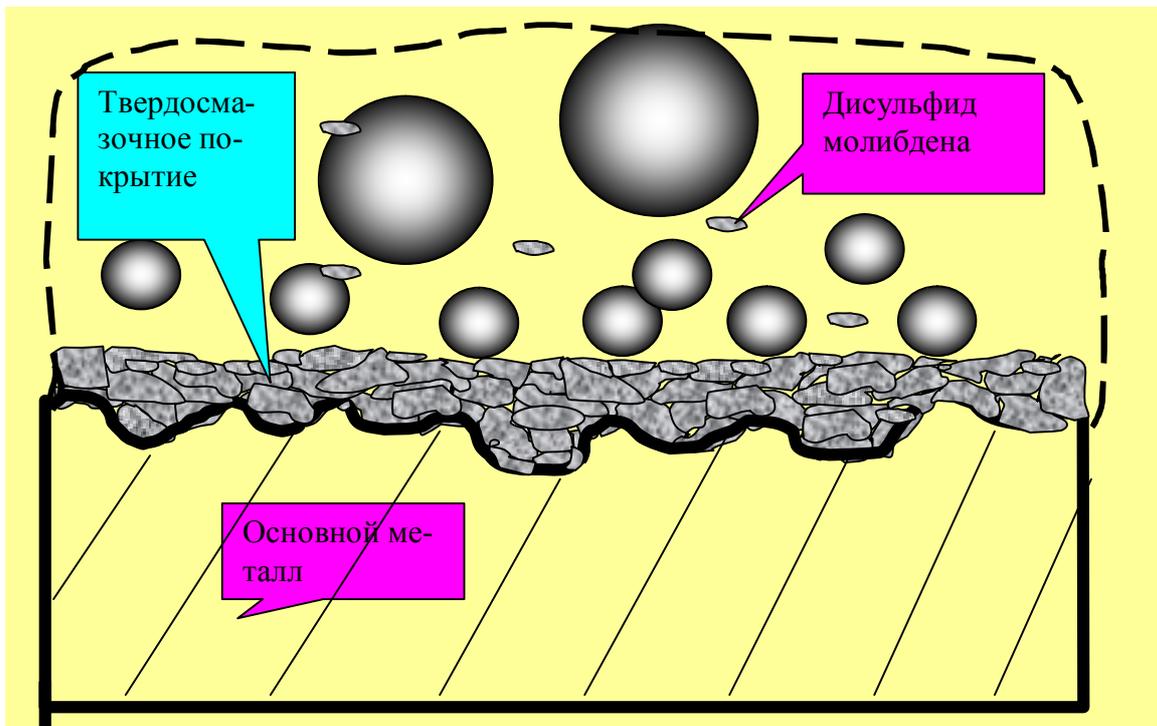


Рисунок 2 в – Модель формирования ВиМХП на основе дисульфид молибдена – образование сплошного слоя смазки

С целью увеличения стойкости режущего инструмента в охлаждающие масла вводят дисульфид молибдена. Эта добавка увеличивает скорость резания на 17%, стойкость инструмента на 70 %, что позволяет нарезать одним метчиком 400 деталей из пружинной стали вместо 15. Установлено, что пленка масла, содержащая дисульфид молибдена, препятствует механическому контакту, уменьшая трение стружки о поверхность инструмента. В США провели эксперимент с подшипниками, работающими со скоростью 1000 об/мин при 1000⁰ по F с сухими смазками.

В Англии дисульфид молибдена применяют в автомобильных трансмиссиях и в двигателях внутреннего сгорания при холодном пуске. Отмечено, что дисульфид молибдена не дает осадка на стенках двигателя, способствует лучшему охлаждению и повышает мощность двигателя за счет уменьшения коэффициента трения. Дисульфид молибдена обладает свойствами полупроводников и применяется в радиопромышленности.

С развитием пластмасс, появились такие материалы как нейлон, ацетатная смола, фторокарбон и др. Развитие нано технологий дает возможность уже известным твердосмазочным покрытиям предать новые неизвестные свойства. Так например специалистами FreiLacke (Германия) созданы покрытия с применением акрилат - меламин (обладающее повышенной стойкостью), основным достоинством которого является способность отталкивать с покрытия воду и грязь. Так называемый наноэффект достигается за счет большего по сравнению с обычными покрытиями угла контакта воды (и грязи) с поверхностью металла и меньшей площадью контакта. В результате новое покрытие на 45% эффективнее чем обычные лакокрасочные покрытия, что обуславливает лучшее скатывание и стекание воды и грязи с поверхности металла. Преимущества покрытий с использованием наноэффекта:

1. Вода скатывается с покрытия
2. Органические субстанции (масло, топливо меньше прилипают к поверхности
3. Грязь легче удаляется с такой поверхности. Кроме того, покрытие с наноэффектом имеет повышенные жесткость, коррозионную стойкость и сопротивление возникновению царапин.

В износостойких покрытиях с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренного вещества увеличивается до 88%. Формирование нано кристаллических структур позволяет получать покрытия с уникально высокими свойствами. Например, их микротвердость в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов. Прочность нанокристаллических материалов при растяжении в 1.5-2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов. К примеру при уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа никеля уменьшается от 1330 до 7.9 мкм³/мкм .

Для всех наноматериалов (так же как и для малых частиц) имеет место увеличение теплостойкости с уменьшением размера зерна, но наибольший ее прирост наблюдается для наноматериалов, полученных прессованием порошков. Коэффициент объемного термического расширения увеличивается с уменьшением размера зерна. Коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых, это позволяет внедрять их в состав наносимого покрытия на поверхность металла.

Выводы. Наноразмерные структуры в составе многокомпонентных покрытий открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости коррозионной стойкости достаточно высокой пластичности сохраняя при этом высокие эксплуатационные свойства изделий. Комбинированные методы обработки, получают новое не исследованное направление: вибрационные многокомпонентные композиционные механохимические покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии. Часть I / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 1993.
2. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии. Часть 2 / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 1994.
3. Пугина, Л.И. Дисульфид молибдена / Л.И. Пугина, М.Д. Синявская, И.М. Максимчук. – Киев.: Изд-во «Наукова думка», 1968г.
4. Рысева, Т.Н. Повышение износостойкости пар трения путем совмещения процессов вибрационного упрочнения и нанесения твердосмазочного покрытия дисульфида молибдена: дис. ... канд. техн. наук. / Т.Н. Рысева. – Ростов РИСХМ, 1975.

Иванов Владимир Витальевич

Азовский технологический институт (филиал)
Донского государственного технического университета
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник
Тел: (863-42) 44-2-77
E-mail: ivanov@atidstu.ru

Селеменев Михаил Федорович

Орловский государственный технический университет
Кандидат технических наук, доцент
Тел: (4862) 54-15-03

Марченко Юлианна Викторовна

Азовский технологический институт (филиал)
Донского государственного технического университета
Кандидат технических наук, доцент
Тел: (863-42) 44-2-77
E-mail: daulianna1@rambler.ru

V.V. IVANOV, M.F. SELEMENEV, Y.V. MARCHENKO

**OUTLOOK FOR MOLYBDENUM DISULFIDE APPLICATION AT
FORMATION OF VIBRATION CHEMIMECHANICAL SOLID
LUBRICATION COVERINGS**

In the paper a brief review of vibration mechano-chemical coverings is presented. The samples of practical application of solid oil on the basis of molybdenum disulfide formed under conditions of vibroprocessings are given. The formation procedure of molybdenum disulfide covering is shown.

Key words: *processing combined method, vibration processing, vibration mechano-chemical coverings, solid lubrication.*

BIBLIOGRAPHY

1. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii. Chast' I / A.P. Babichev. – Rostov-na-Donu, 1993.
2. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii. Chast' 2 / A.P. Babichev. – Rostov-na-Donu, 1994.
3. Pugina, L.I. Disul'fid molibdena / L.I. Pugina, M.D. Sinjavskaja, I.M. Maksimchuk. – Kiev.: Izd-vo «Naukova dumka», 1968g.
4. Ryseva, T.N. Povyshenie iznosostojkosti par trenija putem sovmewenija processov vibracionnogo uprochnenija i nanesenija tverdosmazochного pokrytija disul'fida molibdena: dis. ... kand. tehn. nauk. / T.N. Ryseva. – Rostov RISHM, 1975.

Ivanov Vladimir Vitalievich

Azov technological institute (branch)
Don state technological university
Candidate of technical science, associate professor, senior research assistant
Tel. 863-42-44-2-77
E-mail: ivanov@atidstu.ru

Selemenev Michail Feodorovich

State University – Education Science Production Complex
Candidate of technical science, associate professor
Tel.: 4862-54-15-03

Marchenko Julianna Vicktorovna

Azov technological institute (branch)
Don state technological university
Candidate of technical science, associate professor
Tel. 863-42-44-2-77
E-mail: daulianna@rambler.ru

УДК 621.9.048.7

В.В. МОРОЗОВ, А.Н. ШЛЕГЕЛЬ, А.В. АБОРКИН

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ ФОРМОВЫХ КОМПЛЕКТОВ СТЕКЛОФОРМУЮЩИХ МАШИН

Предложены эмпирические математические модели лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов стеклоформирующих машин, которые позволили установить взаимосвязь между параметрами обработки и характеристиками зоны упрочнения – твердостью и глубиной. Определен наиболее рациональный режим лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов.

Ключевые слова: лазерное термоупрочнение кромок, эмпирическая модель.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время, подавляющее большинство стеклозаводов, занимающихся литьем стеклопосуды, используют формовые комплекты из специального серого чугуна (ферритного, низколегированного, пластинчато-вермикулярного), как наиболее оптимального материала по теплофизическим характеристикам и характеру взаимодействия с расплавленной стекломассой.

В процессе производства стеклотары детали формового комплекта соприкасаются со стекломассой, имеющей температуру 970–1200°C, работают круглосуточно в циклическом режиме открытия-закрытия, соударяясь с периодичностью 4-8 с в зависимости от типа стеклоформирующей машинолинии. Низкий ресурс деталей формокомплекта позволяет снимать порядка 250-300 тыс. бутылок с одного формовочного комплекта, что не удовлетворяет потребностям массового производства посуды в непрерывном режиме и является серьезной проблемой для заводов, вынуждающей часто останавливать автоматические линии для замены форм с потерей рабочего времени и снижения объема выпуска продукции. Причинами столь низкого ресурса форм является выгорание углерода в чугуне и его выкрашивание под воздействием высоких температур, абразивный и ударный износ, что в свою очередь, приводит к постепенному разрушению рабочей поверхности форм формокомплекта. Поэтому увеличение ресурса работы формовых комплектов для литья стеклотары, от которого напрямую зависит объем выпуска, является актуальной задачей.

Проведенный анализ стойкости и характера износа чугунных деталей формовых комплектов показал, что наиболее подвержены износу формирующие поверхности, рабочие кромки и соприкасающиеся поверхности замка сцепления деталей формокомплектов (рис.1). Наибольшему износу подвержены кромки разъема и торцевые кромки. Поэтому для увеличения общей стойкости формовых комплектов достаточно повысить стойкость их кромок.

Одним из наиболее приемлемых, перспективных и действенных методов повышения стойкости кромок разъема деталей формовых комплектов для литья стеклотары является лазерное термоупрочнение (ЛТУ) непрерывным излучением.

На основе анализа работ по финишному ЛТУ [1] и из условий обеспечения высоких трибо-технических

свойств уточнены требования к основным показателям качества, которые предъявляются к рабочим кромкам чугунных деталей формокомплектов: твердость 55 – 65 HRC или 624 – 953 HV, которая соответствует мартенситу; толщина (глубина) мартенситной зоны более 0,25 мм; отсутствие трещин в зоне упрочнения; отсутствие оплавления поверхности кромки.

Целью данной работы является построение эмпирических математических моделей лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов стеклоформирующих

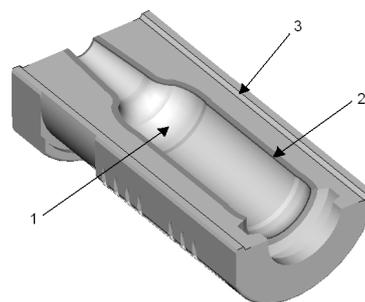


Рисунок 1 – Чистовая полуформа 0,5 л.
1 – формирующая поверхность;
2 – рабочая кромка; 3 – замок сцепления

машин, которые позволят установить взаимосвязь между параметрами обработки и характеристиками зоны упрочнения – твердостью и глубиной. По результатам моделирования определить наиболее рациональный режим лазерного упрочнения.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации экспериментов, был использован многоканальный CO₂-лазер МТЛ-2М мощностью 3 кВт, с длиннофокусной системой транспортировки и фокусировки излучения. Фокусное расстояние линзы $f = 1240$ мм. Излучение лазера представляет собой набор 60 параллельных гауссовых пучков, излучаемых пакетом газоразрядных трубок. Этот лазер обеспечивает значительно более равномерное распределение плотности мощности за фокальной плоскостью.

При выполнении экспериментов были выбраны скоростные режимы термоупрочнения от 3 до 9 мм/с, смещение лазерного луча относительно кромки $\delta = 2$ мм, диаметр пятна излучения $d_{\text{п}} = 13$ мм, эффективный диаметр пятна $d_{\text{п.эф}} = 6,8$ мм, обработка проходила за один проход вдоль кромки [2, 5]. Смещение лазерного луча δ обеспечивает сочетание максимальной глубины упрочнения, непосредственно у самой кромки, с минимальными потерями излучения из-за смещения луча лазера относительно облучаемой поверхности.

Мощность лазерного излучения P определялась по результатам компьютерного моделирования процесса упрочнения с учетом выбранного коэффициента поглощения полимерного покрытия типа МСЦ-510 и уточнялась экспериментально [5]. Критерием оценки максимальной мощности для отдельно взятого скоростного режима являлось недопущение оплавления упрочняемой поверхности кромки исследуемого образца.

Исследование на каждом скоростном режиме выполнено на примере ферритных, низколегированных, пластинчато-вермикулярных чугунов, являющихся типичными при изготовлении деталей формовых комплектов для литья стеклотары.

Сбор и обработку экспериментальных данных осуществляли методом оптической микроскопии на поперечных шлифах. Твердость определялась от поверхности кромки вглубь материала микротвердомером ПМТ-3, а микроструктура изучалась по ГОСТ 3443-87 [3] на микроскопе МИМ-8 и Epihot TME 200.

Результат измерения микротвердости зоны упрочнения чугуна ЧФ4 от ООО Завод «Флакс» представлен на рисунке 2.

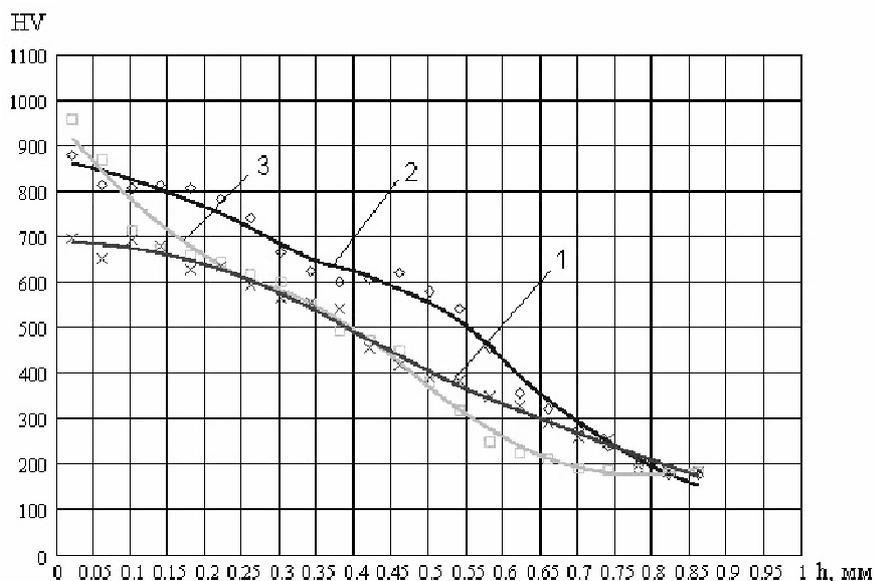


Рисунок 2 – Распределение твердости HV по толщине упрочненного слоя h на трех режимах
 1 – $v = 3$ мм/с, $P = 880$ Вт; 2 – $v = 6$ мм/с, $P = 1020$ Вт; 3 – $v = 9$ мм/с, $P = 1130$ Вт.

На основе проведенного регрессионного анализа экспериментальных данных получена модель, связывающая параметры ЛТУ с средней арифметической твердостью зоны уп-

рочнения. Для режимов $v=3-9$ мм/с, $P=880-1130$ Вт, $d_{п}=13$ мм, получено уравнение регрессии с натуральным значением факторов:

$$Y+135,904=0,741P+0,021v-0,024Pv,$$

где Y – параметр оптимизации, среднее арифметическое по 22 замерам твердости от кромки вглубь материала;

v – скорость термоупрочнения;

P – мощность лазерного излучения.

Полученная модель адекватна по F -критерию Фишера, все коэффициенты модели значимы по t -критерию Стьюдента.

В результате анализа данных явно выраженного оптимального режима не выявлено. Наблюдается восхождение функции отклика на всем исследуемом диапазоне параметров лазерного термоупрочнения (рис. 3).

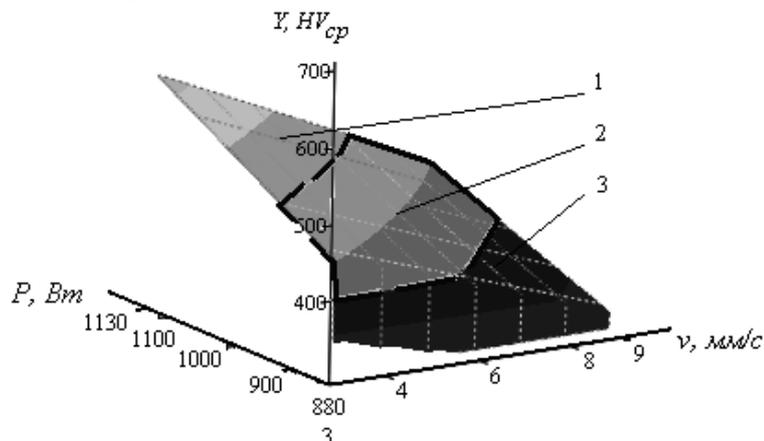


Рисунок 3 – Зависимость параметра оптимизации Y от скорости v и мощности P при лазерном термическом упрочнении

1 – зона оплавления; 2 – зона термоупрочнения без оплавления поверхности; 3 – зона незначительного упрочнения.

Согласно требованиям к основным показателям качества ЛТУ, поверхность значений параметра оптимизации можно разделить на три зоны (рис. 3). Первая зона (1) значений параметра оптимизации (примерно от 500 HV) соответствует процессу ЛТУ с оплавлением поверхности. Вторая зона (2) характеризует процесс ЛТУ без оплавления поверхности (примерно от 400-500 HV). Третья зона (3) показывает процесс, при котором термоупрочнение происходит незначительно или вообще не происходит (примерно до 400 HV).

По результатам экспериментов были получены эмпирические зависимости, характеризующие связь скорости процесса ЛТУ с мощностью излучения лазера и характеристиками зоны упрочнения – глубиной, твердостью у поверхности кромки:

– зависимость глубины упрочнения (h , мм) от скорости (v , мм/с) (рис. 4):

$$h=0,859-0,014v-7,143 \times 10^{-4}v^2,$$

– зависимость твердости у поверхности кромки зоны упрочнения (HV , по Виккерсу) от скорости (v , мм/с) (рис. 5):

$$HV=382,857+102,143v-5,029v^2,$$

– зависимость мощности лазерного излучения (P , Вт) от скорости (v , мм/с) (рис. 6):

$$P=669,429+75,571v-2,714v^2,$$

Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превысило 5%.

Из рис. 4, 5, 6 видно, что на режимах, близких к скорости 6 мм/с, получают зоны ЛТУ с достаточно высокой твердостью и глубиной, что соответствует требованиям к основным показателям качества, которые предъявляются к рабочим кромкам чугуновых деталей формокомплектов.

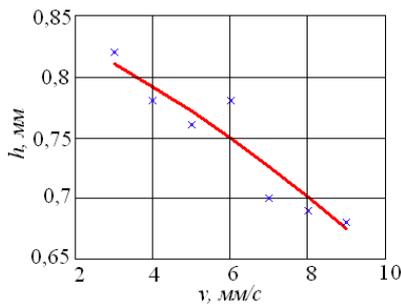


Рисунок 4 – Зависимость глубины упрочнения h от скорости v (×) – эксперимент; (—) – расчет

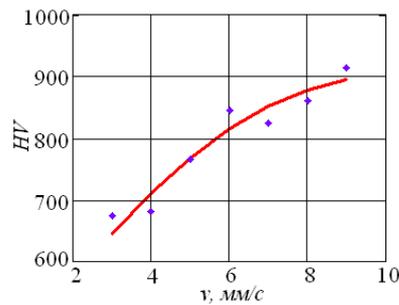


Рисунок 5 – Зависимость твердости у поверхности кромки зоны упрочнения HV от скорости v (+) – эксперимент; (—) – расчет

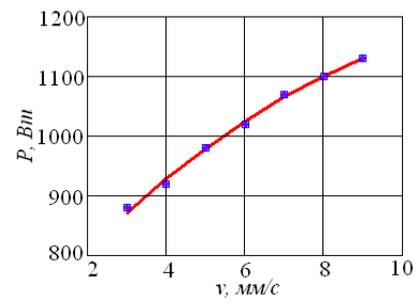


Рисунок 6 – Зависимость мощности лазерного излучения P от скорости v (□) – эксперимент; (—) – расчет

У нескольких исследуемых образцов, которые подвергались нагреву до рабочих температур (температура $T=600$ °С, выдержка 30 мин) кромок деталей формокомплектов, в зоне упрочнения была обнаружена трещина, а скоростной режим был 9 мм/с. При термоциклировании, эксплуатации формы, данная трещина может увеличиться в размерах, что приведет к разрушению кромки и последующему выпуску бракованной стеклотары.

Таким образом, термоупрочнение на режиме в районе 9 мм/с и выше может привести к нежелательным последствиям – браку. На других режимах лазерного термоупрочнения образование трещин не было обнаружено.

Что касается режима термоупрочнения при $v = 3$ мм/с, то он нежелателен с точки зрения уменьшения производительности обработки лазерным лучом.

Поэтому, скоростной режим лазерного термоупрочнения 6 мм/с и связанный с ним диапазон 5 – 7 мм/с можно считать рабочим и качественным, для типичных чугунов, из которых изготавливаются детали формокомплектов.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненных экспериментальных исследований ЛТУ рабочих кромок деталей формокомплектов получены:

1. Эмпирическая математическая модель, связывающая параметры ЛТУ мощность P , скорость v (диаметр пятна d_n фиксирован) с средней арифметической твердостью зоны упрочнения Y . Математическая модель адекватна по F -критерию Фишера, все коэффициенты модели значимы по t -критерию Стьюдента.
2. Зависимости глубины упрочнения h , твердости у поверхности кромки зоны упрочнения HV , мощности лазерного излучения P от скорости v . Расхождение расчетных и экспериментальных значений не превысило 5%.
3. Рациональный режим лазерного термоупрочнения кромок разъема деталей формокомплектов, изготовленных из ферритных, низколегированных, пластинчато-вермикулярных чугунов, соответствующий $v=6$ мм/с, $P=1020$, $d_n=13$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
2. Морозов, В.В. Исследование износостойкости упрочненных лазерным излучением кромок деталей формовых комплектов для литья стеклотары / В.В. Морозов, В.И. Югов, А.Н. Шлегель // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №7. – С. 52-56.
3. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с определенной формой графита.
4. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.
5. Шлегель, А.Н. Имитационная модель лазерного термоупрочнения кромок разъема деталей формокомплектов для литья стеклотары / А.Н. Шлегель // Сборник материалов Конференции Машиностроение – Традиции и Инновации (МТИ-2010). Секция «Автоматизация и информационные технологии». – М.: ИЦ Станкин, 2010 – С. 209-216.

Морозов Валентин Васильевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир
Доктор технических наук, профессор, ректор университета
Тел. (4922) 47-97-27

Шлегель Александр Николаевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир
Старший преподаватель кафедры Автоматизации технологических процессов
Тел. (4922) 47-98-61
E-mail: shlegel81@rambler.ru

Аборкин Артемий Витальевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир
Старший преподаватель кафедры Технология машиностроения
Тел. (4922) 47-99-56
E-mail: aborckin@vlsu.ru

V.V. MOROZOV, A.N. SHLEGEL, A.V. ABORKIN

**EMPIRICAL MODELS OF LASER HARDENING OF WORKING EDGES
OF PARTS OF MOLDS OF GLASS-FORMING MACHINES**

Empirical mathematical models of laser hardening of the working edges of parts of molds of glass-forming machines, which allowed to establish the interconnection between the parameters of the processing and the characteristics of the zone of hardening – the hardness and the depth – were offered. The most efficient mode of laser hardening of working edges of parts of molds was determined.

Key words: laser thermal hardening of edges, empirical model.

BIBLIOGRAPHY

1. Grigor'janc A. G., Safonov A. N. Lazernaja tehnika i tehnologija: V 7 kn. Kn. 3. Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki / Pod red. A.G. Grigor'janca. – M.: Vysshaja shkola, 1987. – 191 s.
2. Morozov, V.V. Issledovanie iznosostojkosti uprochnennyh lazernym izlucheniem kromok detalej formovyh komplektov dlja lit'ja steklotary / V.V. Morozov, V.I. Jugov, A.N. Shlegel' // Uprochnjajuwie tehnologii i pokrytija. – 2007. – №7. – S. 52-56.
3. GOST 3443-87. Otlivki iz chuguna s opredelennoj formoj grafitu.
4. Spiridonov, A.A. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov / A.A. Spiridonov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s., il.
5. Shlegel', A.N. Imitacionnaja model' lazernogo termouprochnenija kromok raz#ema detalej formokomplektov dlja lit'ja steklotary / A.N. Shlegel' // Sbornik materialov Konferencii Mashinostroenie – Tradicii i Innovacii (MTI-2010). Sekcija «Avtomatizacija i informacionnye tehnologii». – M.: IC Stankin, 2010 – S. 209-216.

Morozov Valentin Vasilievich

Vladimir state university, Vladimir
Doctor of technical science, professor, rector of the university
Tel. 4922-47-97-27

Shlegel Aleksandr Nickolaevich

Vladimir state university, Vladimir
Senior teacher of department “Automation of technological processes”
Tel. 4922-47-98-61
E-mail: shlegel81@rambler.ru

Aborckin Artemy Vitalievich

Vladimir state university, 87, Vladimir
Senior teacher of department “Mechanical engineering technology”
Tel. 8-903-648-13-76
E-mail: aborckin@vlsy.ru

М.В. ПЕСИН, Е.Д. МОКРОНОСОВ

К ПРОБЛЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Разработаны процессы управления напряженно-деформированным состоянием длинномерных цилиндров в ходе их обработки, включающей термообработку, правку поперечным изгибом, растачивание, хонингование отверстий, позволяющие достигать непрямолинейности в пределах 0,1 мм на 1 м длины после завершающей операции ионно-вакуумного азотирования в импульсной плазме без дополнительной обработки. Разработаны технологические процессы упрочнения высоконагруженных резьбовых поверхностей соединительных переводников бурильных и насосно-компрессорных труб ионно-вакуумным азотированием в импульсной плазме, увеличивающие, в том числе за счет создания новых высокомоментных резьбовых соединений, ресурс их работы в 3...5 раз.

Ключевые слова: азотирование, упрочнение, азотирование, штанговый насос, переводники, высокомоментные резьбовые соединения.

ЗАО «Пермская компания нефтяного машиностроения» широко освоило применение различных методов упрочнения деталей машин:

1. Газопламенное напыление с оплавлением.
2. Плазменное напыление.
3. Сверхзвуковое напыление.
4. Оплавление ТВЧ напылённого слоя.
5. Хромирование, кадмий-хромирование.
6. Химическое никель-фосфорное покрытие.
7. Фосфатирование.
8. Ионно-вакуумное азотирование.

Использование данных методов позволяет промышленному предприятию производить качественную и конкурентоспособную продукцию с повышенным ресурсом, например, увеличены эксплуатационные свойства упрочненных азотированием сталей 38Х2МЮА, 07Х3ГНМ, 15Х2ГМФ, а именно: коррозионная и абразивная стойкость поверхности канала цилиндра плунжерной пары скважинного штангового насоса (СШН) для добычи нефти. Так в условиях отдельных месторождений увеличен ресурс работы с 2-4 месяцев до 1 года и более.



Рисунок 1 – Установка ионного азотирования

Параметры модернизированной установки ионного азотирования: номинальная: мощность импульсного источника питания - 175 кВА; напряжением в импульсе - 400-800 В; номинальным импульсный ток – 180 А; рабочее давление в камере - 0,5-8 мБар; рабочая температура - 450-600 °С; максимальный вес обрабатываемых деталей – 3000 кг.



Рисунок 2 – Азотирование деталей нефтегазового назначения



Рисунок 3 – Азотирование цилиндров штанговых насосов

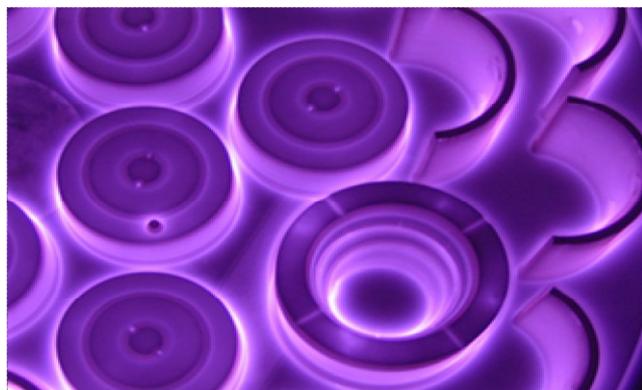


Рисунок 4 – Азотирование деталей машиностроения



Рисунок 5 – Азотирование деталей общего машиностроения

Следует отметить, что установка ионного азотирования позволяет производить бездеформационное упрочнение рабочих поверхностей деталей, например, при традиционном азотировании прямолинейность оси длинномерных цилиндров выше допустимых величин, и последующее исправление непрямолинейности правкой изгибом и хонингованием приводит к разрушению (образованию трещин) или удалению упрочненного слоя.

Увеличен ресурс работы высоконагруженных резьбовых соединений бурильных труб и соединительных переводников. Применяемые средства защиты резьб фосфатированием, меднением не обеспечивают требуемой защиты от износа, в том числе адгезионного.

Разработанный ЗАО «Пермская компания нефтяного машиностроения» («ПКНМ») технологический процесс ионно-вакуумного азотирования в импульсной плазме сталей 38Х2МЮА (38ХМЮА), 07Х3ГНМ, 15Х2ГМФ увеличивает, в сравнении с традиционными методами, толщину нитридного слоя на внутренней поверхности цилиндров до 10...15 мкм,

твердость упрочненного слоя на поверхности 1000...1200 HV и на глубине от поверхности 0,127 мм не менее 446 HV, при минимальном короблении длинномерных деталей в результате изменения их напряженного состояния.

Разработаны процессы управления напряженно-деформированным состоянием длинномерных цилиндров в ходе их обработки, включающей термообработку, правку поперечным изгибом, растачивание, хонингование отверстий, позволяющие достигать непрямолинейности в пределах 0,1 мм на 1 м длины после завершающей операции ионно-вакуумного азотирования в импульсной плазме без дополнительной обработки.

Изготовлены опытно-промышленные партии переводников УБТ, ВБТ, ТБТ и НКТ, проводятся их испытания.

Разработаны технологические процессы упрочнения высоконагруженных резьбовых поверхностей соединительных переводников бурильных и насосно-компрессорных труб ионно-вакуумным азотированием в импульсной плазме, увеличивающие, в том числе за счет создания новых высокомоментных резьбовых соединений, ресурс их работы в 3...5 раз.

Проведены научно-исследовательские работы по ионно-вакуумному азотированию замковых резьб УБТ, ВБТ, ТБТ.

Изготовлены опытно-промышленные партии и проводятся испытания азотированных роторов винтовых забойных двигателей.

Для изготовления плунжеров СШН используется газопламенное напыление с оплавлением.



Рисунок 6 – Газопламенное напыление с оплавлением

С целью удовлетворения возросшей потребности в изготовлении нестандартного оборудования, ПКНМ организовало совместное предприятие с немецкой фирмой *DE-LORO STELLITE* по сверхзвуковому напылению деталей длиной до 11 м. На сегодня освоена технология изготовления деталей СШН для ОРЭ – это плунжеры, полые штоки и др. Так в 2008 г. для башкирской нефтяной компании были изготовлены полые штоки диаметром 27 и 38 мм длиной 5000 мм с повышенной износостойкостью. В 2009 изготовлены штоки диаметром 20 мм и длиной 2800 мм.



Рисунок 7 – Сверхзвуковое напыление

Повышение качества поверхности является важнейшей составляющей качества всей детали. Такие эксплуатационные качества как износостойкость, коррозионная стойкость, термостойкость практически полностью зависят от состояния и свойств поверхностного слоя. Процесс ионно-вакуумного азотирования в импульсной плазме в совокупности со специальной технологией подготовки поверхности как раз позволяет модифицировать поверхностный слой для получения заданных высоких параметров.

Широкий спектр материалов, которые можно эффективно обрабатывать с помощью этого метода, невысокая себестоимость, экологичность процесса позволяют говорить о его несомненной актуальности.

Одной из наиболее частых причин непланового прекращения добычи нефти и подъёма СШН является выход из строя пары цилиндр-плунжер по причине повышенного износа

или задиров. С учётом масштабов нефтедобычи, а только наша компания производит и поставляет 7-8 тыс. насосов в год, и стоимости спуска-подъёма примерно в 300 тыс. рублей, увеличение наработки на отказ в 1,5-2 раза, которой нам удалось достичь на наших насосах, даёт значительный экономический эффект. Таких результатов удалось достигнуть с помощью ионно-вакуумного импульсного азотирования цилиндров и напыления плунжеров, в результате повышения твёрдости азотированного слоя до 1100HV, увеличения коррозионной стойкости по сравнению с традиционной технологией обработки в 3 раза, увеличения нитридного слоя до 10...15 мкм при общей толщине азотированного слоя 0,3...0,5 мм.

Повышение качества труб УБТ в их замковой части также обеспечивает большой экономический эффект. Обрыв трубы (в большинстве случаев это связано с поломкой в замковой части трубы) приводит к возможной потере колонны бурильных труб и телеметрической аппаратуры - это убытки в размере 30-40 млн. рублей. Износ резьбовых концов из-за многократных процессов свинчивания и развинчивания тоже является критичным показателем «жизнеспособности» бурильной трубы. Работы по ионно-вакуумному импульсному азотированию переводников бурильных труб, переводников труб НКТ позволили значительно повысить качество резьбовых концов и увеличить число циклов завинчивания - развинчивания в 3 раза.

Внедрение технологии азотирования роторов винтовых забойных двигателей и насосов может привести к увеличению износостойкости в 2 раза по сравнению с традиционным хромированием, кроме того, азотирование – экологически безопасный процесс.

Таким образом, суммируя вышеизложенное, можно говорить о высокой актуальности применяемых технологий упрочнения, применяемых ПКНМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песин М.В., Мокроносов Е.Д. Технологические особенности упрочнения деталей скважинных штанговых насосов. Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. В 2ч. Ч.2: материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13-16 апреля 2010 г./ Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербург гос. политехн. ун-т, науч.-произв. «Фирма Плазмацентр». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010г.

2. Песин М.В., Мокроносов Е.Д. Скважинное оборудование для ОРЭ: разработка, внедрение, сервис, особенности изготовления СШН. Инженерная практика Производственно-технический журнал – официальное издание Семинаров Экспертного совета по механизированной добычи нефти, изд. Energy Press и РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, посвященных совершенствованию производства и технологий в области разработки нефтегазовых месторождений и добычи нефти и газа. – №1(2) 2010г

3. Песин М.В., Мокроносов Е.Д. Триботехническое упрочнение высоконагруженных поверхностей деталей и создание на этой основе производства изделий нефтегазового назначения./ Журнал «Экспозиция. Нефть. Газ» №9/2010 стр.8-9.

4. «Повышение эксплуатационной надежности скважинного штангового насоса». Е.Д. Мокроносов, д-р техн. наук, В.В. Богданов, М.Н. Елтышев (ЗАО «Пермская Компания Нефтяного Машиностроения»). Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение» №12/2007 стр.43-44.

5. «ЛУКОЙЛ-Пермь» эксплуатирует лучшие насосы // «Пермская нефть» №25 от 27.12.2006г.

6.«Ионное азотирование - прогрессивная технология поверхностного упрочнения». В.В. Богданов // Передовой опыт №7, 1984;

7. «Скважинные штанговые насосы». Заслуженный изобретатель РСФСР, д.т.н., профессор Е.Д. Мокроносов. Межрегиональный рекламный журнал «Удмуртия. Регион 18» №06 (0010) 2007 стр.38-39.

Песин Михаил Владимирович

ЗАО «Торговый дом ПКНМ» («Пермская компания нефтяного машиностроения»), г. Пермь, Пермский государственный технический университет

Кандидат технических наук, доцент, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию, доцент кафедры «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета

Тел. (342) 265-15-22, 265-06-70, 263-11-52

Моб. (912)4855505

E-mail: M.Pesin@mail.ru; marketing@PKNM.ru

Мокронос Евгений Дмитриевич

ЗАО «Торговый дом ПКНМ» («Пермская компания нефтяного машиностроения»)

Генеральный директор, доктор технических наук, профессор

Тел. (342) 265-15-22, 265-06-70, 263-11-52

E-mail: marketing@PKNM.ru

M.V. PESIN, E.D. MOKROUSOV

**TO THE PROBLEM OF TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL
IN MACHINE ELEMENT PRODUCTION**

There are developed processes for deflected mode control of long- length cylinders in the course of their machining comprising heat treatment, transverse bending straightening, hole boring and honed finishing, allowing achieving a non-straightness level within 0.1 mm (0,0039 inch) on 1.0 m (3 7/25 ft) length after a completion operation of ionic-vacuum nitration in pulse plasma without further processing. There are elaborated technological processes of hardening high-loaded threaded surfaces of connecting subs in drill pipes and tubings by ionic-vacuum nitriding in pulse plasma increasing their endurance (also due to creating new high-torque threaded connections) by a factor of three ... five.

Key words: nitriding, hardening, hole-boring sucker-rod pump, subs, high-torque threaded connections.

BIBLIOGRAPHY

1. Pesin M.V., Mokronosov E.D. Tehnologicheskie osobennosti uprochneniya detalej skvazhinnyh shtangovyh nasosov. Resursosberegajuwie tehnologii remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detalej mashin, mehanizmov, oborudowanija, instrumenta i tehnologicheskoy osnastki ot nano- do makrourovnja. V 2ch.Ch.2: mate-rialy 12-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 13-16 aprelja 2010 g./ Federal'noe agentstvo po obrazovaniju, Sankt-Peterburg gos. politehn. un-t, nauch.-proizv. «Firma Plazmacentr». – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2010g.

2. Pesin M.V., Mokronosov E.D. Skvazhinnoe oborudovanie dlja ORJe: razrabotka, vnedrenie, servis, osobennosti izgotovlenie SShN. Inzhenernaja praktika Proizvodstvenno-tehnicheskij zhurnal – oficial'noe izdanie Seminarov Jekspertnogo soveta po mehanizirovannoj dobychi nefi, izd. Energy Press i RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina, posvawennyh sovershenstvovaniju proizvodstva i tehnologij v oblasti razrabotki neftegazovyh mestorozhdenij i dobychi nefi i gaza. – №1(2) 2010g

3. Pesin M.V., Mokronosov E.D. Tribotehnicheskoe uprochnenie vysokonagruzhenykh poverhnostej de-talej i sozdanie na jetoj osnove proizvodstva izdelij neftegazovogo naznachenija./ Zhurnal «Jekspozicija. Neft'. Gaz» №9/2010 str.8-9.

4. «Povyshenie jekspluatacionnoj nadezhnosti skvazhinного shtangovogo nasosa». E.D. Mokronosov, d-r tehn. nauk, V.V. Bogdanov, M.N. Eltyshev (ZAO «Permskaja Kompanija Neftjanogo Mashinostroenija»). Ezheme-sjachnyj mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Himicheskoe i neftegazovoe mashi-nostroenie» №12/2007 str.43-44.

5. «LUKOIL-Perm'» jekspluatiruet luchshie nasosy // «Permskaja neft'» №25 ot 27.12.2006g.

6.«Ionnoe azotirovanie - progressivnaja tehnologija poverhnostnogo uprochneniya». V.V. Bogdanov // Peredovoj opyt №7, 1984;

7. «Skvazhinnye shtangovye nasosy». Zasluzhennyj izobretatel' RSFSR, d.t.n., professor E.D. Mokronosov. Mezhhregional'nyj reklamnyj zhurnal «Udmurtija. Region 18» №06 (0010) 2007 str.38-39.

Pesin Michail Vladimirovich

CJSC „Trading House PKNM“ („Perm company of oil engineering“), Perm,

Perm state technical university

Candidate of technical science, associate professor, first deputy director for oil field equipment, associate professor of department “Machine engineering technology” of Perm state technical university

Tel. 342-265-15-22, 265-06-70, 263-11-52

Mob.tel. 912-4855505

E-mail: M.Pesin@mail.ru; marketing@PKNM.ru

Mokronosov Eugeny Dmitrievich

CJSC „Trading House PKNM“ („Perm company of oil engineering“)

General Director, doctor of technical science, professor

Tel. 342-265-15-22, 265-06-70, 263-11-52

E-mail: marketing@PKNM.ru

УДК 621.787.6.004

Д.Л. СОЛОВЬЕВ, А.В. КИРИЧЕК, М.Н. МЕДВЕДЕВ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРАКОВ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН ДЕФОРМАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Предложена технология статико-импульсной обработки отверстий траков гусеничных машин, обеспечивающая большую глубину и степень упрочнения поверхностного слоя, что позволит повысить их долговечность в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, траки гусеничных машин.

Машины с гусеничным приводом занимают достаточно большую часть современной транспортной техники. К ним относятся промышленные и сельскохозяйственные тракторы, снегоболотоходные транспортеры, специальные тягачи, различные установки на гусеничном ходу, используемые для монтажа производственного или технологического оборудования, трубоукладчики на строительстве нефте- и газопроводов и т.д. Гусеничный движитель является одним из важнейших механизмов, определяющих тяговые качества, производительность, экономичность и надежность всех этих машин. Поэтому задача повышения долговечности его элементов достаточно актуальна.

Тяговое усилие в гусеничном движителе создается за счет перематывания гусеничных лент состоящих из отдельных звеньев – траков. Одной из проблем эксплуатации гусеничного движителя является быстрый износ отверстий траков, которыми они соединяются между собой с помощью пальцев. Эту проблему частично решают изготовлением траков из марганцовистой стали, которая хорошо сопротивляется износу при трении, особенно в условиях абразивного воздействия грунта. Однако, как показывает практика, отверстия траков все еще являются одними из наиболее быстро изнашиваемых элементов гусеничного движителя.

Известно, что повысить износостойкость сопрягающихся поверхностей деталей машин, работающих при трении, можно повышением их твердости. Особенность химического состава марганцовистой стали позволяет существенно повышать ее твердость только упрочнением поверхностным пластическим деформированием (ППД). Исходя из тяжелых условий работы траков, очевидна необходимость в создании не только большой твердости упрочненного поверхностного слоя, но и его большой глубины.

Упрочнение ППД внутренних цилиндрических поверхностей диаметром менее 100...120 мм возможно только дорнованием, при котором инструмент – дорн проходит вдоль упрочняемого отверстия, формируя наклепанный слой с высокой твердостью. Диаметр дорна выполняют больше диаметра упрочняемого отверстия на величину натяга. С увеличением натяга, соответственно, должна увеличиваться сила, прикладываемая к дорну. В зависимости от натяга и величины прикладываемой силы появляется возможность создания различных давлений в области контакта инструмента и поверхности. При малых значениях давления, менее $3\sigma_T$ (где σ_T – предел текучести обрабатываемого металла), и натягах, не превышающих 0,25 мм, улучшается микрогеометрия поверхности, однако глубина упрочненного поверхностного слоя составляет не более 0,5 мм, поэтому такое дорнование обычно используется как отделочно-упрочняющая операция. При больших давлениях, более $3\sigma_T$, и натягах, достигающих 2...4 мм – дорнование с большими натягами, формируется упрочненный поверхностный слой с большой степенью и глубиной упрочнения до 3 мм и более [1, 2].

Проведенные исследования показали, что создание высоких давлений при деформационном упрочнении с большими натягами энергетически более выгодно ударной (импульсной) нагрузкой [3]. Так, упрочнением статико-импульсной обработкой (СИО) плоских поверхностей деталей машин, изготовленных из марганцовистой стали, был получен упрочненный поверхностный слой с твердостью до 6500 МПа и глубиной до 8 мм (рис. 1). При СИО основное деформирующее воздействие осуществляется импульсной нагрузкой. Статическая нагрузка имеет сравнительно небольшую величину (порядка 0,1 от динамической)

и в основном предназначена для обеспечения жесткости системы: генератор ударных импульсов – приспособление – инструмент – заготовка. Импульсная нагрузка при СИО характеризуется не только энергией и частотой, но и формой ударных импульсов, которая выбирается такой, чтобы обеспечивать максимальную передачу кинетической энергии ударов в упрочняемый металл, создавая максимально глубокий упрочненный поверхностный слой. Форма ударных импульсов регулируется геометрическими параметрами используемой в генераторе импульсов ударной системы боек-волновод. Волновод является не только промежуточным звеном, передающим от бойка нагружаемому металлу ударные импульсы, но и важным элементом для рекуперации отраженных волн деформации и создания требуемой формы ударных импульсов.

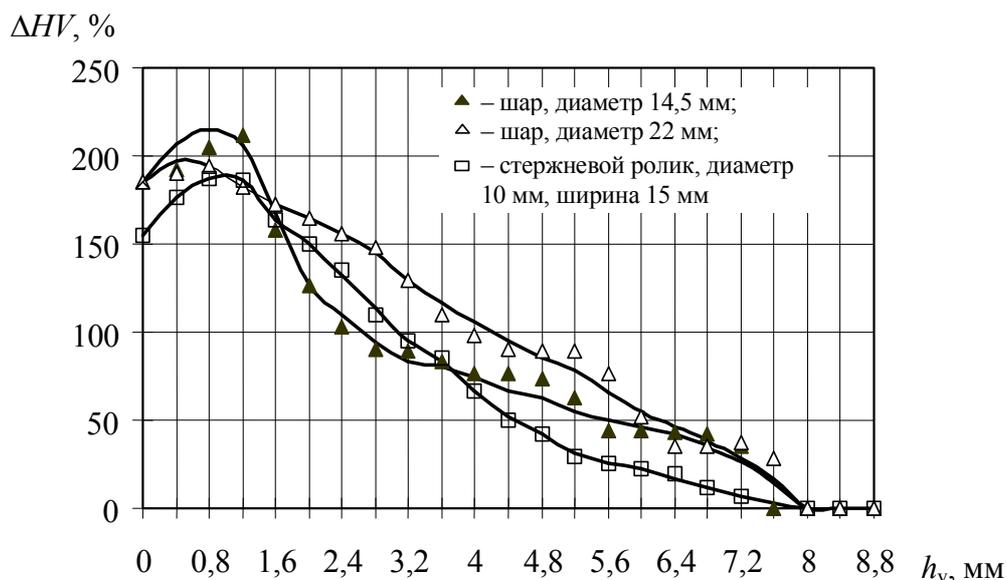


Рисунок 1 – Изменение степени упрочнения ΔHV по глубине поверхностного слоя h_v после СИО деталей из марганцовистой стали 110Г13Л (исходная твердость $HV=2100$ МПа)

Упрочнение СИО коротких (до 150 мм) отверстий осуществлялось по способу прошивания, когда инструмент проходит сквозь отверстие под действием толкающей нагрузки [4-7]. Однако такая схема упрочнения для отверстий траков не может быть использована, поскольку суммарная длина отверстий траков на одной оси превышает 150 мм. Причем технологический процесс упрочнения траков должен учитывать необходимость обеспечения соосности отверстий последовательно расположенных на одной оси. Для этого в качестве инструмента должен применяться многокольцевой дорн с длиной рабочей части обеспечивающей одновременное упрочнение не менее двух последовательно расположенных отверстий, а прикладываемая к дорну нагрузка должна быть тянущей.

Таким образом, схема для упрочнения СИО отверстий траков гусеничных машин будет выглядеть следующим образом (рис. 2). Трак 1 устанавливается на столе 4 установки для упрочнения, базируясь по торцевой поверхности. Дорн, состоящий из колец 2 размещенных на оправке 3, частично внедряется под действием статической силы в упрочняемое отверстие трака. На конце оправки 3 крепится волновод 6. Боек 5 генератора импульсов имеет возможность свободного перемещения вдоль оправки. Ударные импульсы генерируются при ударе бойка по волноводу и передаются через оправку кольцам дорна, обеспечивая их поступательное перемещение внутри упрочняемого отверстия и соответствующее пластическое деформирование его стенок. Форма ударных импульсов будет регулироваться изменением геометрических параметров бойка и волновода. Технологическими параметрами процесса СИО траков гусеничных машин являются: натяг, количество колец дорна, энергия, частота и форма ударных импульсов.

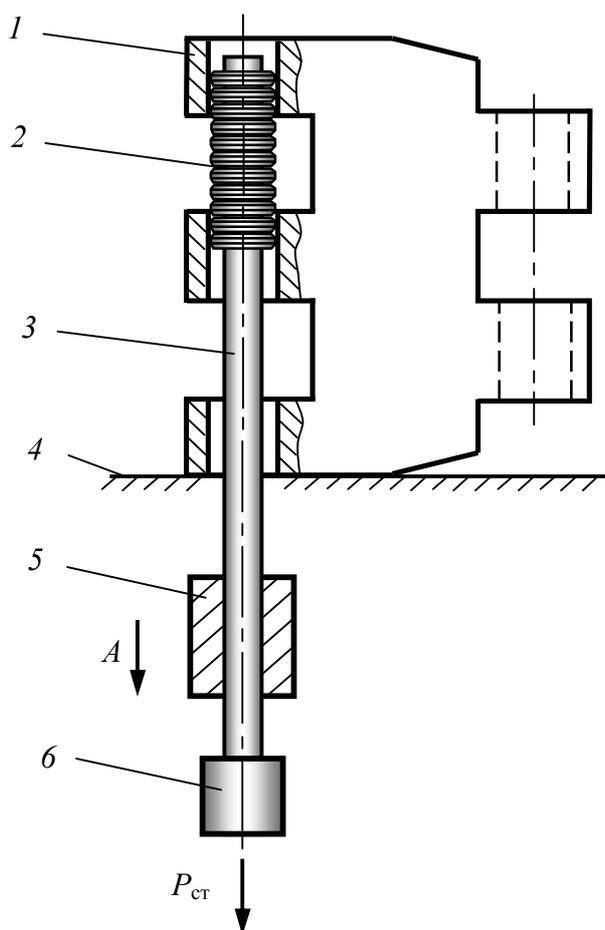


Рисунок 2 – Схема упрочнения отверстий траков статико-импульсной обработкой
A – энергия ударов, $P_{ст}$ – статическая составляющая нагрузки
 1 – трак, 2 – кольцо дорна, 3 – оправка, 4 – рабочий стол, 5 – боек, 6 – волновод

Использование предложенной схемы позволит осуществить деформационное упрочнение отверстий траков, создавая наклепанный поверхностный слой с большой толщиной (до 8 мм) и твердостью достигающей 6500 МПа, что будет способствовать повышению их долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качество машин: Справочник в 2 т. / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. Т.2. 430 с.
2. Монченко, В.П. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидропневмоцилиндров / В.П. Монченко, В.В. Белотелов. – М.: НИИМАШ, 1976. – 91 с.
3. Киричек, А.В. Технологические возможности статико-импульсной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. – № 8. – С. 3-5.
4. Киричек, А.В. Повышение эффективности деформационного упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей нагружением пролонгированными ударными импульсами / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2007. – №1. – С. 45-49.
5. Киричек, А.В. Деформационное упрочнение отверстий статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. – № 5. – С. 3-5.
6. Киричек, А.В. Исследование влияния параметров статико-импульсного дорнования на глубину упрочненного слоя / А.В. Киричек, А.В. Поляков, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2008. – №3-7. – С. 47-50.
7. Киричек, А.В. Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.В. Поляков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. – № 6. – С. 14-16.

Исследования выполнены при поддержке гранта МД-5864.2010.8

Киричек Андрей Викторович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г Орел

Доктор технических наук, профессор, директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

тел./ fax (4862)555524

E-mail: avk@ostu.ru

Соловьев Дмитрий Львович

Муромский институт Владимирского государственного университета
Доктор технических наук, профессор кафедры «Станки и инструмент»
тел.(49234)77101
E-mail: murstin@yandex.ru

Медведев Максим Николаевич

Муромский институт Владимирского государственного университета
Студент
тел.(49234)77101
E-mail: murstin@yandex.ru

D.L. SOLOV'EV, A.V.KIRICHEK, M.N. MEDVEDEV

**OPPORTUNITIES OF INCREASE OF DURABILITY TRACKS
CATERPILLAR MACHINES DEFORMATION HARDENING**

Offered technology static-impulse processing of the hole trawl of the caterpillar machines, providing greater depth and degree hardening surface layer that will allow to raise their longevity in process of the usages.

Key words: *hardening, surface plastic deformation, section of the caterpillar machines.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kachestvo mashin: Spravochnik v 2 t. / Pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie, 1995. T.2. 430 s.
2. Monchenko, V.P. Deformirujuwaja obrabotka otverstij vtulok i gil'z gidropnevmocilindrov / V.P. Monchenko, V.V. Belotelov. – M.: NIIMASh, 1976. – 91 s.
3. Kirichek, A.V. Tehnologicheskie vozmozhnosti statiko-impul'snoj obrabotki / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Uprochnjajuwие tehnologii i pokrytija. 2006. – № 8. – S. 3-5.
4. Kirichek, A.V. Povyshenie jeffektivnosti deformatsionnogo uprochnenija vnutrennih cilindricheskih poverhnostej nagruzheniem prolongirovannymi udarnymi impul'sami / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Izvestija OrelGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie. 2007. – №1. – S. 45-49.
5. Kirichek, A.V. Deformatsionnoe uprochnenie otverstij statiko-impul'snoj obrabotkoj / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev // Uprochnjajuwие tehnologii i pokrytija. 2007. – № 5. – S. 3-5.
6. Kirichek, A.V. Issledovanie vlijanija parametrov statiko-impul'snogo dornovanija na glubinu uprochnennogo sloja / A.V. Kirichek, A.V. Poljakov, D.L. Solov'ev // Izvestija OrelGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie. 2008. – №3-7. – S. 47-50.
7. Kirichek, A.V. Uprochnenie otverstij statiko-impul'snym dornovaniem / A.V. Kirichek, D.L. Solov'ev, A.V. Poljakov // Uprochnjajuwие tehnologii i pokrytija. 2009. – № 6. – С. 14-16.

Kirichek Andrey Viktorovich

State University – Education Science Production Complex
Doctor of technical science, professor, director of Technological institute named after N.N.Polykarpov
Tel./fax: 4862-555524
E-mail: avk@ostu.ru

Solovyev Dmitry Lvovich

Murom institute of Vladimir state university
Doctor of technical science, professor of department “Machining stations and instrument”
Tel. 49234-77101
E-mail: murstin@yandex.ru

Medvedev Maksim Nickolaevich

Murom institute of Vladimir state university
Student
Tel. 49234-77101
E-mail: murstin@yandex.ru

УДК 621.09.047

Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, С.Н. ГРИГОРЬЕВ

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ С НАЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В статье рассматривается методология проектирования комбинированных методов обработки с наложением электрического поля. Ее реализация позволяет управлять сочетаниями физических формообразующих воздействий, увеличивая или снижая значения технологических показателей в зависимости от целей проектировщиков. Методология дает возможность создавать новые наукоемкие конкурентоспособные объекты, реализовывать новые технологии в машиностроении

Ключевые слова: технология, комбинированные методы обработки, методология, электрическое поле.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для снижения трудоемкости изготовления и повышение качества и эксплуатационных характеристик современных машин необходимо создание и внедрение принципиально новых высокоэффективных технологических процессов. По мнению многих исследователей в области технологии машиностроения, такие технологии могут быть созданы на базе комбинированных методов обработки (КМО) с наложением электрического поля, которые включают в себя известные физические явления (механические, тепловое, химические, магнитные, ядерное воздействия). На основании накопленных знаний, можно говорить, что применение комбинированных методов способно принципиально расширить технологические возможности изготовления перспективных конструкций, проектирование которых ранее ограничивалось возможностями известных технологических приемов, создавать наукоемкие, высокотехнологичные и конкурентоспособные изделия, в том числе и в области авиастроения, производства космической техники, транспортного и энергетического машиностроения. Между тем, до настоящего времени отсутствует методология проектирования КМО, что не позволяет разработчикам с достаточной быстротой создавать новые технологические процессы с показателями, максимально приближенными к теоретически обоснованными пределами. Кроме того, пока исследованы только частные вопросы приложения комбинированных методов обработки, отвечающие только конкретным целям исследователей, что не позволяет адаптировать их для решения более сложных технологических проблем. Из всего вышесказанного вытекает задача данного исследования – разработка эффективной методологии проектирования КМО.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КМО

Для проектирования технологических процессов КМО необходимо учитывать влияние особенностей базовых методов на технологические показатели комбинированного метода. Анализ показывает, что можно достичь, для каждого из методов, одного или нескольких показателей, значительно превышающих аналогичные для остальных. Как показывают проведенные исследования, объединение нескольких воздействий в одном комбинированном методе обработки может создать условия для сохранения положительных технологических параметров при максимальном снижении отрицательных. При этом надо учитывать, что взаимное воздействие структурных элементов КМО может оказаться значительно интенсивнее прямого влияния и нейтрализовать или даже ухудшить суммарный результат проектирования нового процесса.

Методология проектирования КМО включает 3 этапа:

1. Оценка предельных технологических показателей процесса при использовании различных сочетаний физических воздействий. Для этого используют метод оптимизации по закономерностям делового конфликта. Результатом этапа является получение ядра конфликта в форме вариантов наиболее эффективных сочетаний воздействий.

2. Оптимизация сочетаний технологических процессов, спроектированных на базе выбранных на первом этапе воздействий. Здесь учитывается взаимное влияние составляю-

щих комбинированного процесса и оценивается величина нежелательных технологических составляющих, которые рассматриваются в качестве ограничений при моделировании структуры комбинированного процесса.

3. Выбор единственного выигрышного варианта комбинированного процесса путем адаптации каждого варианта к конкретной технологической операции, технологические показатели которой наиболее полно отвечают запросам разработчика на рассматриваемом этапе жизненного цикла изделия

При разработке конструкции, проектировании технологических процессов изготовления и сборки изделий, их эксплуатации возможны многочисленные варианты решения поставленных задач. Необходимо найти единственный вариант, наиболее полно отвечающий требуемым техническим и экономическим показателям объекта исследований.

Оптимизация возможных решений обычно проводится путем перебора известных рациональных вариантов и оценки их результативности экспертами или автоматически с помощью вычислительной техники. Длительность нахождения рабочего варианта решения зависит от квалификации исполнителей, полноты исходной информации, уровня программного обеспечения используемой вычислительной техники. В ряде случаев время, затраченное для принятия решения, может превысить допустимые пределы, что приведет к возникновению аварийных ситуаций (например, при испытании двигателей). Ускорение принятия рациональных решений снизит сроки создания новых изделий. Можно достаточно быстро найти достоверное решение при оценке возможных вариантов по одному параметру. При решении этой задачи обычно оценивается несколько показателей (технических, экономических, организационных и др.) с использованием вычислительной техники, но это требует больших затрат машинного времени и приводит к получению нескольких возможных решений. Последующая оценка результатов экспертами дает возможность выбрать единственное рациональное мнение, но при наличии высококвалифицированных специалистов, согласных на длительный цикл обоснования вариантов.

Существует возможность использования балльной системы оценки возможных вариантов решения с использованием вычислительной техники, где критерием достижения требуемого уровня служит получение вероятности наилучшего результата (не ниже 95 %). Такая система дала положительные результаты на всех этапах жизненного цикла изделий при использовании независимых параметров исследуемых процессов.

Если воздействующие на процесс факторы связаны между собой, то оценка их взаимного влияния требует длительных исследований и не всегда возможна. За время, необходимое для принятия рациональных решений, могут измениться условия протекания процессов и полученные сведения становятся ненужными.

Для получения рациональных решений при многопараметрической оптимизации с взаимосвязанными параметрами авторы использовали положения теории делового конфликта, которая с помощью вычислительной техники позволяет быстро проанализировать возможные варианты решений и сформировать так называемое "ядро конфликта", в котором остается одно или несколько вариантов, наиболее полно учитывающих введенную исходную информацию и взаимное влияние факторов, влияющих на процесс. Оптимизация вариантов происходит достаточно быстро, что дает возможность эксперту (или экспертам) выбрать рациональное решение за минимальное время.

При использовании теории делового конфликта начальные сведения закладываются в исходных данных, где дается достоверная и полная информация о возможных причинах дефектов. На этапе создания нового объекта в исходных данных возможны значительные противоречия, так как практически отсутствует статистика по изучаемому вопросу или реализация решения требует чрезмерно больших материальных затрат. Иногда возникает необходимость в длительных исследованиях процесса на макетах, образцах, что нарушает плановые сроки выпуска изделия. Возможности получения обоснованного решения может мешать недостаточная квалификация экспертов, слабая материальная база. Большинство входящих факторов может учитываться в качестве граничных условий при поиске ядра конфликта.

На рисунке 1 приведен алгоритм проектирования КМО, где конфликтные ситуации заложены в исходных данных, т.к. желания заказчика учитывают, в основном, экономическую сторону, а не принципиальные возможности создания новых процессов.

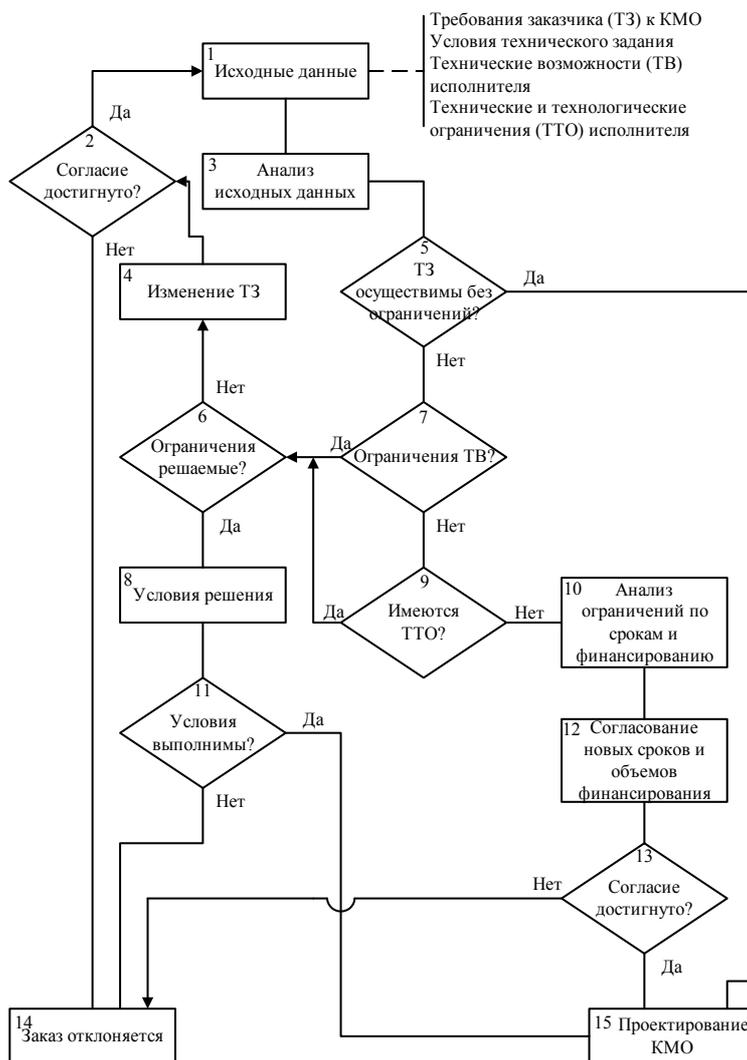


Рисунок 1 – Алгоритм проектирования КМО

Многие из требований заказчика в настоящее время неосуществимы технически или требуют длительных исследований и чрезмерных финансовых вложений для их выполнения. Здесь проявляется конфликт между требованиями заказчика и объективно существующими возможностями создателя требуемых КМО (переходы 5; 6; 7 на рис. 1). Следующим этапом развития конфликтной ситуации является рассогласование потребностей заказчика и возможностей исполнителя (переходы 5; 9; 6 на рис. 1) по технологическим возможностям и другим показателям проектируемого метода. Это может быть конфликт по срокам выполнения заказа или объемам финансирования (переходы 10; 11 на рис. 1). В алгоритме не показаны конфликты между уровнем знаний исполнителей и сложностью решаемых задач; уровнем и состоянием материальной базы относительно требуемых для выполнения заказа исполнителем, т.к. предполагается, что исполнителем является головной коллектив, обладающий опытом и ресурсами для выполнения поставленных задач.

При изучении теории конфликта следует научно обосновать ограничения, до которых конфликтная ситуация разрешима. Для этого используются методы векторного анализа и экспертные системы, определяющие окончательную границу решения проблемы в условиях конфликта.

МОДЕЛЬ ВЫХОДА ИЗ КОНФЛИКТНОЙ СИТУАЦИИ

При формировании модели выхода из конфликтной ситуации при проектировании КМО предполагается, что, несмотря на различные начальные позиции сторон, все заинтересованы в получении согласованного объективно доказанного решения. В основу такой модели положена возможность сближения мнений сторон путем последовательного улучшения проектных решений исполнителей и внесения в структуру процесса изменений, устраняющих невыполнимые требования к разработчикам КМО.

По [1] в качестве причины делового конфликта рассматриваются требования заказчика, которые составляют вход конфликтной системы S, имеющей N структурных составляющих. Целевая функция W представляет граничные условия, учитывающие возможности структурных физических воздействий КМО.

$$S \subset X \otimes Y, \tag{1}$$

где X – входные требования, определяемые заказчиком КМО.

Это может быть другой отдел или цех предприятия, самостоятельная фирма

$$X \subset \sum_1^N X_i; \quad X_i = X_{i1} \times X_{i2} \times \dots \times X_{i\overline{ni}}$$

где X_i – составляющие характеристики требований;

i – количество требований (i = 1, N);

⊗ - декартово произведение;

Y – приемлемые решения исполнителя-разработчика КМО (выходные показатели системы)

$$Y \subset \sum_1^M Y_j; \quad Y_j = Y_{j1} \times Y_{j2} \times \dots \times Y_{j\overline{mj}} \tag{2}$$

где j – количество решений, удовлетворяющих требованиям заказчика (j = 1, M).

Количество реализаций входных требований K = 1, n_i.

Число возможных реализаций вариантов r системы у исполнителя составит

$$r = 1 \cdot m_j. \tag{3}$$

Целевая функция W представляет синтез целей W_i, где i = 1, N, которые представляют граничные условия, согласованные между заказчиком и исполнителем.

Входные требования X, X_i определяются начальными условиями, выполнение которых создает основу разработки новых технологических процессов. Они могут быть заданы функциями полезности [1] q(x), определяющими переход системы к улучшенному варианту (q_i).

$$q(x) = q(x, R(c, x)), \tag{4}$$

$$q_i(x_i) = q_i(x_i, R_i(c_i, x_i)), \tag{5}$$

где R – реакция системы;

R_i – вариант реакции, R = {R_i};

c – состояние системы;

c_i – варианты состояния системы, c = {c_i}.

Сужение зоны конфликта происходит, если последующий вариант улучшает показатели системы и сближает позиции сторон. Обозначив улучшение через символ >, получаем

$$x_{i+1} > x_i \quad \text{при} \quad x_i \cdot x_{i+1} \subset x \tag{6}$$

Тогда

$$q(x_{i+1}) > q(x_i) \tag{7}$$

Связь с выходными параметрами системы S происходит через реакцию R и состояние системы "С".

$$S_i, R_i : (c_i x_i) \rightarrow y_j (x_i y_j) \subset S_j. \tag{8}$$

За счет конфликта системы возникают обратные связи, т.е. часть выходов системы S_i поступает на входы системы S_j.

Тогда из всех возможных вариантов решения необходимо выбрать два элемента S_i, S_j и рассмотреть их взаимодействие

$$S_i \cdot S_j \subset S. \quad (9)$$

Связь подсистем S_i с S_j формализуется матрицей связи H_0 , в которой при единстве векторов x_i и y_j в момент конфликта $H_i=1$, а при рассогласовании векторов $H_i=0$.

Таким образом

$$x_{ik} = y_{jr} \Big|_{=1} \quad (10)$$

$$x_{ik} \neq y_{jr} \Big|_{=0}, \quad (11)$$

где $k, r = \overline{1, L}$ (L – размерность матрицы H_0).

Следовательно, при совпадении векторов x_i и y_j элемент матрицы $H_0=1$. С учетом (9)

$$x_i = H_0 \cdot y_j \quad (12)$$

Для всей системы

$$H_S = (H_0)N, M, \quad (13)$$

где N, M характеризует количество подсистем системы $S (s_i, s_j)$

$$i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}.$$

На любую конфликтную систему S воздействует внешняя среда (требования заказчика, возможности исполнителя и др.), т.е. входы системы S постоянно изменяются с учетом действия обратных связей от выходных показателей y_j .

По [1] внешнее воздействие характеризуется системой S_0

$$S_0 \subset x_0 \otimes y_0.$$

Функция q_0 , обеспечивающая достижение некоторой цели W_0 через реакцию R_0 , имеет вид

$$q_0(x_0, R_0(c_0, x_0)). \quad (14)$$

Тогда функция связи S с учетом внешней среды может быть записана через матрицу H

$$\begin{aligned} X &= H_{0S}; \\ X_{0S} &= H_{S0} \cdot Y, \end{aligned} \quad (15)$$

где $H_{0S} = (H_{01}, H_{02} \dots H_{0N})$;

$H_{S0} = (H_{10}, H_{20} \dots H_{N0})$;

$X_0 = (X_{0S}, X_{S0})$.

Здесь X_{0S} – входы внешней среды S_0 , которые не зависят от связей S .

По [1] генеральное воздействие можно представить как $T_{ij} = H_0 \cdot R_i$.

Тогда количество решений для выполнения требований заказчика X_i

$$y_j = T_{ij}(c_i, X_i), \quad (16)$$

где $c_i \in C_i, x_i \in X_i, y_j \in Y_j, i, j = \overline{0, N}$.

При изменении входного условия в требуемом направлении появляются новые значения этих требований, учитывающих предлагаемые решения. Тогда вектор входа системы принимает значения X_j^i .

Динамику изменения зоны конфликта между заказчиком и исполнителем можно представить по [1] в виде матрицы

$$\left\| \begin{array}{cccc} X_0^0 & X_1^0 & X_2^0 & \dots & X_N^0 \\ X_0^1 & X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_N^1 \\ & & \vdots & & \\ X_0^N & X_1^N & X_2^N & \dots & X_N^N \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cccc} T_{00}(c_0, X_0) & T_{01}(c_0, X_0) & \dots & T_{0N}(c_0, X_0) \\ T_{10}(c_1, X_1) & T_{11}(c_1, X_1) & \dots & T_{1N}(c_1, X_1) \\ & & \vdots & \\ T_{N0}(c_N, X_N) & T_{N1}(c_N, X_N) & \dots & T_{NN}(c_N, X_N) \end{array} \right\| \quad (17)$$

Левая часть матрицы (17) характеризует входные требования к рассматриваемой конфликтной системе, T – пути решения задачи по согласованию конфликтных позиций, а знак равенства характеризует получение приемлемого для заказчика и исполнителя решения.

Переход от Y_j решения к Y_{j+1} возможен при условии, что $Y_{j+1} \succ y_j$ и происходит с учетом взаимного воздействия частных решений на систему S .

Такие решения выполнимы, если функции q, R, T дифференцируемы по X . Для этого систему S разделяют на входную S_i и выходную S_j , отражающие соответственно требования заказчика и возможности исполнителя. Конфликт возникает, если системы несовместимы.

Для сближения позиций сторон требуется сузить зону конфликта. С этой целью изменяют в требуемую сторону на величину $\Delta X_i(S_i)$ вектор X_i варианта подсистемы S_i . Тогда

$$X_i + \Delta X_i(S_i) \succ X_i \text{ или } q_i(X_i + \Delta X_i(S_i)) \succ q_i(X_i).$$

В результате ускоряется достижение цели W_i по одному из требований заказчика на величину выходного показателя системы ΔY_i

$$\Delta Y_i(S_i) = \frac{\partial R_i}{\partial X_i} \Delta X_i(S_i), \quad (18)$$

где положительное воздействие изменения входного требования составит

$$\Delta \bar{X}_j^i(S_i) = H^{ij} \frac{\partial R_i}{\partial X_i} \Delta \bar{X}_i(S_i)$$

или через T_{ij}

$$\Delta \bar{X}_j^i(S_i) = \frac{\partial T_{ij}}{\partial X_i} \Delta \bar{X}_i(S_i). \quad (19)$$

Взаимное влияние от изменения требований на входе в систему может быть учтено через $\Delta \bar{X}_j^i(S_i)$

$$\Delta \bar{X}_j^i(S_i) = \frac{\partial T_{ij}}{\partial X_i} \Delta \bar{X}_i(S_i). \quad (20)$$

Общий эффект от сближения позиций можно представить как сумму векторов

$$\Delta X_j = \Delta \bar{X}_j^i + \Delta \bar{X}_j \quad (21)$$

и выразить через функцию полезности q_j

$$\Delta q_j(S_i) = \frac{\partial q_j}{\partial X_j^i} \frac{\partial T_{ij}}{\partial X_i} \Delta X_i(S_i) + \frac{\partial q_j}{\partial X_j^i} \frac{\partial T_{jj}}{\partial X_j} \Delta X_j(S_i). \quad (22)$$

Конфликтная ситуация между системами S_i и S_j сохраняется (т.е. согласие между заказчиком и исполнителем не достигнуто) и расхождение увеличивается, если

$$\Delta q_i(S_i) < 0. \quad (23)$$

Следовательно, следует отбросить исследуемый вариант решения и рассмотреть последующие варианты, оценивая их преимущество по критерию (23).

Чем больше величина $\Delta q_j(X_j)$, тем эффективнее принятое решение. Оптимизация выбора выполняется по максимальному значению $\Delta q_j(X_j) \rightarrow \max$ для всех предлагаемых вариантов решения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований, проводимых в Воронежском государственном техническом университете при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-283.2010.8), была создана теория размерной обработки с анодным растворением ниже границы потерь напряжения, что ранее считалось не приемлемым. Практическая реализация способа

стала возможной при использовании методологии, показанной выше. Новый вид обработки достаточно полно описан в работах [2,3,4]. Новое научное направление по проектированию комбинированных процессов с наложением низковольтного напряжения устранило проблему регулирования и поддержания межэлектродного зазора, что упростило создание средств технологического оснащения. Кроме того, удалось устранить погрешности, связанные с нестационарностью процессов, присущей финишным операциям (достигнута точность до 6-7 квалитета). Решение вопросов изготовления деталей при низких напряжениях открывает возможность разработки общей теории проектирования комбинированных процессов с достижением показателей, близких к теоретическому пределу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования и их практическая реализация, позволяют утверждать, что предлагаемая методология проектирования комбинированных методов обработки открывает перспективы достижения технологических показателей, определяющих реализуемый уровень создаваемой техники и возможность её освоения в сроки, обеспечивающие востребованность продукции на мировом рынке промышленных изделий. Возможно создание системы ускоренного проектирования новых высокоэффективных комбинированных методов обработки, сочетающих различные известные воздействия, и обладающих расширенными технологическими возможностями для изготовления разрабатываемых конкурентоспособных сложных, перспективных изделий машиностроения, особенно транспортных машин наземного и воздушного базирования. Решение поставленных в исследовании задач позволяет перевести значительную часть наиболее сложных технологических операций на комбинированные методы обработки, отличающиеся возможностью значительного повышения качества изделия и открывающие возможность для разработчиков улучшить эксплуатационные показатели перспективной техники новых поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев, В.В. Конфликт в структурном представлении систем / В.В. Сысоев, А.Г. Амрахов. – Воронеж: РНКЦ "Ренакорд", 1997. – 27 с.
2. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.
3. Григорьев, С.Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С.Н. Григорьев, Е.В. Смоленцев, М.А. Волосова. – ТНТ, 2009. – 278 с.
4. Смоленцев, Е.В. Технология электрохимической доводки зубчатых передач / Е.В. Смоленцев // Металлообработка. – 2003. – №2. – С. 24-30.

Смоленцев Евгений Владиславович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Тел. (910)746-40-75
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Григорьев Сергей Николаевич

Московский государственный технический университет «Станкин», г. Москва
Доктор технических наук, профессор, ректор ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», заведующий кафедрой «Высокоэффективные технологии обработки»
Тел. (499)972-94-00
E-mail: rector@stankin.ru

E.V. SMOLENTSEV, S.N. GRIGORE'EV

THE METHODOLOGY OF DESIGNING COMBINED PROCESSING METHODS USING ELECTRIC FIELD

This article shows the methodology of designing combined processing methods using electric field. The use of such methodology makes it possible to control combinations of physical forming influences, increasing or decreasing technological indices depending on designers' aims. This methodology creates an opportunity to produce new science intensive competitive objects and use new technologies in mechanical engineering.

Key words: *technology, combined processing methods, methodology, electric field.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sysoev, V.V. Konflikt v strukturnom predstavlenii sistem / V.V. Sysoev, A.G. Amrahov. – Voronezh: RNKC "Renakord", 1997. – 27 s.
2. Smolencev, E.V. Proektirovanie jelektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki / E.V. Smolencev. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 511 s.
3. Grigor'ev, S.N. Tehnologija obrabotki koncentrirovannymi potokami jenergii / S.N. Grigor'ev, E.V. Smolencev, M.A. Volosova. – TNT, 2009. – 278 s.
4. Smolencev, E.V. Tehnologija jelektrohimicheskoy dovodki zubchatykh peredach / E.V. Smolencev // Metalloobrabotka. – 2003. – №2. – S. 24-30.

Smolentsev Eugeny Vladimirovich

Voronezh state technical university, Voronezh

Candidate of technical science, associate professor of department "Machine engineering technology"

Tel. 910-746-40-75

E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Grigoryev Sergey Nickolaevich

Moscow state technical university "Stankin", Moscow

Doctor of technical science, professor, rector GOU VPO MGTU "Stankin", head of department "Highly effective processing technology"

Tel. 499-972-94-00

E-mail: rector@stankin.ru

УДК 602.318.6

Г.В. ЛАЗУТКИН, О.Е. ЛАВРУСЬ, С.Н. ЗЛОБИН, А.В. КОШЕЛЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ГАРМОНИЧЕСКОЙ И КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УПРУГОГИСТЕРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

При исследовании вынужденных колебаний виброзащитных систем рассматриваются возможности применения гармонической линеаризации упругогистерезисных характеристик виброизоляторов с сухим трением. Предлагается вариант квазигармонической линеаризации таких характеристик при существенной нелинейности гистерезисных характеристик. Из решения нелинейных дифференциальных уравнений движения виброзащитных систем определяются условия применимости гармонической или квазигармонической линеаризации.

Ключевые слова: вынужденные установившиеся колебания, виброзащитные системы, упругогистерезисные характеристики, полиномы Чебышева, обобщенные координаты, уравнение движения, гармоническое решение, квазигармоническая линеаризация.

Колебания виброзащитных систем (ВС) с конструкционным гистерезисом для случая их гармонического возбуждения в большинстве случаев носят квазигармонический характер и сопровождаются циклическим деформированием виброизоляторов ВС.

Упругогистерезисные характеристики (УГХ) виброизоляторов при их циклическом нагружении в координатах нагрузка – перемещение могут быть представлены в виде множества петель гистерезиса, соответствующих различным амплитудам перемещения и смещениям центров статического равновесия ВС. Ввиду значительных трудностей создания достоверных расчетных моделей различных классов цельнометаллических виброизоляторов (тросовых, пластинчатых, сетчатых и др.) их УГХ определяют экспериментально с помощью методов теории подобия и анализа размерностей [1]. Получаемые таким образом поля петель гистерезиса могут быть представлены с помощью аппроксимации полиномами Чебышева в обобщенных координатах [2]:

в классе непрерывных функций

$$P(x_u, y_u, A, q) = \sum_{|\lambda|=0}^m p_{\lambda_1 \dots \lambda_4} x_u^{\lambda_1} y_u^{\lambda_2} A^{\lambda_3} q^{\lambda_4} ; \quad (1)$$

$$|\lambda| = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 ,$$

в классе разрывных функций

$$P(\sigma, x_u, A, q) = \sum_{|\lambda|=0}^m (p_{c\lambda_1\lambda_3\lambda_4} + \sigma p_{m\lambda_1\lambda_3\lambda_4}) x_u^{\lambda_1} A^{\lambda_3} q^{\lambda_4} ; \quad (2)$$

$$|\lambda| = \lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 .$$

Здесь $x_u = x - q$; $y_u = \sigma \sqrt{A^2 - x_u^2}$;

$p_{\lambda_1 \dots \lambda_4}$, $p_{c\lambda_1\lambda_3\lambda_4}$, $p_{m\lambda_1\lambda_3\lambda_4}$ – коэффициенты аппроксимации;

x, A, q – соответственно безразмерные перемещения, амплитуда, натяг;

$\sigma = \text{sign} \dot{x}$ – знак скорости нагружения \dot{x} .

При таком подходе к описанию УГХ, виброизоляторов дифференциальное уравнение движения ВС с одной степенью свободы можно записать в обобщенном виде

$$\ddot{x} + P(x_u, y_u, A, q) = Q_0 \cos(\omega t + \alpha_1) , \quad (3)$$

или же

$$\ddot{x} + P(\sigma, x_u, A, q) = Q_0 \cos(\omega t + \alpha_2) , \quad (4)$$

где Q_0 – безразмерная амплитуда возбуждающей гармонической нагрузки;

ω, t – безразмерные частота возбуждения и время соответственно;

\ddot{x} – безразмерное ускорение;

α_1, α_2 – соответствующие сдвиги по фазе между возбуждающей нагрузкой и перемещением.

Решение таких нелинейных дифференциальных уравнений движения ВС можно осуществить с помощью приближенных аналитических методов [2]. Причем на резонансных и околорезонансных режимах возбуждения колебания ВС близки к гармоническим.

$$x_u \approx A \cos \varphi, \quad (\varphi = \omega t). \quad (5)$$

Это позволяет воспользоваться гармонической линеаризацией по Чебышеву при аппроксимации процессов деформирования виброизоляторов по переменным x_u, y_u (1) или x_u и σx_u (2). В результате получим:

для непрерывных функций

$$P = p_{oo}(A, q) + p_{10}(A, q)x_u + p_{01}(A, q)y_u; \quad (6)$$

для разрывных

$$P = p_{co}(A, q) + p_{c1}(A, q)x_u + \sigma p_{mo}. \quad (7)$$

Здесь $p_{oo}(A, q), p_{10}(A, q), p_{01}(A, q), p_{co}(A, q), p_{c1}(A, q), p_{mo}$ – коэффициенты гармонической линеаризации по Чебышеву, зависящие от переменных A и q .

Они могут быть представлены с помощью коэффициентов аппроксимации выражений (1) или (2) последовательно в следующем виде:

$$p_{oo}(A, q) = \sum_{|\lambda|=0}^m p_{oo\lambda_3\lambda_4} A^{\lambda_3} q^{\lambda_4};$$

.....

.....

$$p_{mo}(A, q) = \sum_{|\lambda|=0}^m p_{mo\lambda_3\lambda_4} A^{\lambda_3} q^{\lambda_4}; \quad (8)$$

$$|\lambda| = \lambda_3 + \lambda_4$$

Следует отметить, что при подстановке гармонической формы (5) для переменных x_u и y_u в выражение (6), получаем гармоническую форму и для реакции виброизолятора. Вместе с тем аналогичная процедура с выражением (7) для переменных x_u и σp_{mo} приводит к полигармонической форме реакции виброизолятора, за счет появления высших гармонических составляющих при разложении ступенчатой функции σ в ряд Фурье. В связи с этим аппроксимацию УГХ полиномами Чебышева в виде разрывных кусочно-линейных функций, описывающих петли гистерезиса виброизоляторов в форме (7), будем называть квазигармонической линеаризацией УГХ.

Получим приближенное решение уравнения движения (1) методом гармонического баланса при условии описания реакции виброизолятора $P(x_u, y_u, A, q)$ в виде (6) и гармонической формы колебаний (5). В результате можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot p_{01}(A, q) = Q_o \sin \alpha_1; \\ A [p_{10}(A, q) - \omega^2] = Q_o \cos \alpha_1 \\ p_{oo}(A, q) = 0. \end{cases};$$

Очевидно, необходимым и достаточным условием существования гармонического решения (5) уравнения движения (1) является выполнение неравенства

$$\left| \frac{Ap_{01}(A, q)}{Q_0} \right| < 1. \tag{9}$$

Тогда, для исследования параметров колебаний ВС в зависимости от параметров возбуждающей нагрузки и характера нелинейности УГХ, косвенно отображенных в соответствующих зависимостях коэффициентов аппроксимации (8), можно воспользоваться системой следующих уравнений:

$$\begin{cases} tq\alpha_1 = \frac{p_{01}(A, q)}{p_{01}(A, q) - \omega^2}; \\ A^2 \{ [p_{10}(A, q) - \omega^2]^2 + p_{01}^2(A, q) \} = Q_0^2. \end{cases} \tag{10}$$

Для примера рассмотрим кинематический способ возбуждения колебаний ВС при постоянной амплитуде a_c виброперемещения в переносном движении. Тогда, в случае выполнения неравенства (9), решение о колебаниях ВС, для относительной системы координат соответствует системе уравнений (10). Для удобства проведения расчетов ее второе уравнение можно разрешить относительно частоты ω :

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{A^2 p_{10}}{A^2 - a_c^2} \pm \sqrt{\left(\frac{A^2 p_{10}}{A^2 - a_c^2}\right)^2 - \frac{A^2 (p_{10}^2 + p_{01}^2)}{A^2 - a_c^2}}}$$

Здесь и далее подразумеваем $p_{10} = p_{10}(A, q)$; $p_{01} = p_{01}(A, q)$

Резонансные режимы колебаний с амплитудой A_p определим из условия $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p$, вследствие чего необходимо потребовать:

$$\left(\frac{A_p^2 p_{10}}{A_p^2 - a_c^2}\right)^2 - \frac{A_p^2 (p_{10}^2 + p_{01}^2)}{A_p^2 - a_c^2} = 0$$

Тогда соотношения для нахождения коэффициентов передачи на резонансе μ_p и резонансных частот приобретают следующий вид:

$$\mu_p = \frac{A_p}{a_c} = \sqrt{1 + \frac{p_{10}^2}{p_{01}^2}}; \quad \omega_p = \sqrt{p_{10} \left(1 + \frac{p_{01}^2}{p_{10}^2}\right)}$$

где A_p – амплитуда колебаний на резонансе.

Заметим, что в абсолютной системе координат для амплитуды колебаний A_a справедливо выражение

$$A_a = \sqrt{A^2 + a_c^2 + 2Aa_c \cos\alpha_1}$$

В случае силового способа возбуждения колебаний ВС с амплитудой Q_0 аналогичным образом получаем

$$\omega_{1,2} = \sqrt{p_{10} \pm \sqrt{\frac{Q_0^2}{A^2} - p_{01}^2}},$$

причем для резонансных частот ω_p^* и коэффициентов передачи μ_p^* справедливы выражения

$$\omega_p^* = \sqrt{p_{10}}; \quad \mu_p^* = \frac{p_{10} A_p}{Q_0} = \frac{p_{10}}{p_{01}}.$$

В случае невыполнения неравенства (9) гармоническая форма решения нелинейного дифференциального уравнения (3) является неправомерной.

Как было установлено в работе [3] это вызвано не учетом высших гармонических составляющих при колебаниях ВС, вызванных силами неупругого сопротивления. В самом простейшем виде их можно учесть, рассматривая квазигармонические решения уравнения

движения (4) при условии квазигармонической линеаризации УГХ виброизоляторов в форме (7). Рассмотрим квазигармонические колебания ВС, когда за период ω^{-1} скорость движения обращается в ноль только дважды. Тогда закон движения ВС можно записать в виде:

$$x_u(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos i\omega t + B_i \sin i\omega t, \forall n \in [1, \infty), \quad (11)$$

причем при $t=0$ выполняются условия

$$\sum_{i=1}^n A_i = A; \quad \sum_{i=1}^n iB_i = 0, \quad \forall_i \in [1, 3, 5 \dots n]. \quad (12)$$

Представим ступенчатую функцию $\sigma p_{m0}(A, q)$ в виде гармонического ряда Фурье

$$\sigma p_{m0}(A, q) = \frac{4p_{m0}(A, q)}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \sin i\omega t,$$

и перепишем уравнение движения (4) в виде

$$\ddot{x} + p_{c1}(A, q)x = Q_o \cos(\omega t + \alpha_2) - p_{co}(A, q) - \frac{4p_{m0}(A, q)}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \sin i\omega t.$$

Подставляя в это уравнение закон движения в форме (11) и приравнявая полученные гармоники в правой части с гармониками в левой части (метод гармонического баланса) с учетом выражений (12), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} A = A_1; \sum_{i=3}^n A_i = 0; \\ B_i = \frac{4p_{m0}(A, q)}{\pi i(p_{c1} - i^2\omega^2)}; \\ p_{co}(A, q) = 0; \\ A[p_{c1}(A, q) - \omega^2] = Q_o \sin \alpha_2; \\ \frac{4p_{m0}(A, q)}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{p_{c1}(A, q) - \omega^2}{p_{c1}(A, q) - i^2\omega^2} = Q_o \sin \alpha_2. \end{cases}$$

Причем необходимое и достаточное условие существования решения (11), как и для случая (9), можно представить в виде

$$\left| \frac{4p_{m0}(A, q)}{Q_o \pi} \sum_{i=1}^n \frac{p_{c1}(A, q) - \omega^2}{p_{c1}(A, q) - i^2\omega^2} \right| < 1. \quad (13)$$

Тогда для исследования квазигармонических колебаний можно воспользоваться решениями следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} p_{co}(A, q) = 0; \\ A^2 [p_{c1}(A, q) - \omega^2]^2 + \frac{16p_{m0}^2(A, q)}{\pi^2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_{c1}(A, q) - \omega^2}{p_{c1}(A, q) - i^2\omega^2} \right)^2 = Q_o^2; \\ B_i = \frac{4p_{m0}(A, q)}{\pi i(p_{c1} - i^2\omega^2)}; \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом, при невыполнении условия (9) необходимо выбрать для исследования колебаний ВС систему уравнений (14), в противном случае - систему уравнений (10). Причем, если не выполняются оба условия, то линеаризация УГХ как в виде (6) так и (7) неправомерна, а колебания ВС не могут иметь гармоническую или квазигармоническую форму. Следует отметить, что при одновременном выполнении условий (9) и (13) выбор вида решения (5) или (11) можно определить, как вариант, с помощью критериев

$$\varepsilon_1 = \left| 1 - \frac{Ap_{01}(A, q)}{T_1(A, q)} \right|,$$
$$\varepsilon_2 = \left| 1 - \frac{p_{m0}(A, q)}{T_2(A, q)} \right|,$$

где T_1 и T_2 – значения нагрузок, найденных соответственно с помощью выражений (1) или (2) при условии $x_u = 0$; $y_u = A$; $m \geq 3$. При этом, если $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, то выбирают для исследования систему уравнений (10). В противном случае – систему уравнений (14)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет и конструирование средств виброзащиты сухого трения / В.А. Антипов, Ю.К. Пономарев, А.И. Белоусов [и др.] – Самара: СамГУПС, 2005. – 207 с.
2. Лазуткин, Г.В. Виброизоляторы из материала МР (тип ДКУ) / Г.В. Лазуткин; Куйбышевский авиационный ин-т.; деп. в ВИНТИ 16.08.85. – № 6112. – 150 с.
3. Лазуткин, Г.В. Вынужденные периодические колебания виброзащитных систем с конструкционным гистерезисом / Г.В. Лазуткин // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – С. 81 - 86.

Лазуткин Геннадий Васильевич

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная графика»
Тел. (846) 995-83-33
E-mail: om46@mail.ru

Лаврус Ольга Евгеньевна

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»
Тел. (846) 995-83-33
E-mail: om46@mail.ru

Злобин Сергей Николаевич

ФГОУ ВПО «Госунiversитет–УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41-98-35
E-mail: zsn2@rambler.ru

Кошелев Алексей Викторович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Инженер
241035, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, 7
Тел. (4832) 56-02-61

G.V. LAZUTKIN, O.E. LAVRUS, S.N. ZLOBIN

RESEARCH OF COMPELLED ESTABLISHED FLUCTUATIONS VIBRODAMPING SYSTEMS BY MEANS OF HARMONIOUS AND QUASIHARMONIOUS LINEARIZATION RESILIENT HYSTERESIS CHARACTERISTICS DAMPER

At research of the compelled fluctuations vibrozischitnye systems opportunities of application harmonious linearizatsiya of uprugogistereziykh characteristics vibroizolyatorov with dry friction are considered. The variant kvaziharmonious linearizatsiya such characteristics. Is offered at essential no linearity gistereziykh characteristics. From the decision of the nonlinear differential equations of

movement vibrozischnykh systems conditions of applicability harmonious or kvaziharmonious linearizatsiya are defined.

Key words: *the compelled established fluctuations, vibrodamping systems, resilient hysteresis characteristics, polynoms of Chebysheva, the generalized coordinates, the movement equation, the harmonious decision, a quasiharmonious linearization.*

Lasutkin Gennady Vasilyevich

Samara state university of communication lines, Samara

Candidate of technical science, associate professor of department "Engineering graphics"

Tel. 8-846-995-83-33

E-mail: om46@mail.ru

Lavrus Olga Eugenyevna

Samara state university of communication lines, Samara

Candidate of technical science, associate professor of department "High Mathematics"

Tel. 8-846-995-83-33

E-mail: om46@mail.ru

Zlobin Sergey Nickolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department "Automation processes and machines of chipless process materials"

302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,

Tel.: 4862-41-98-35

E-mail: zsn2@rambler.ru

Koshelev Aleksey Viktorovich

Bryansk State Technical University

241035, Bryansk, bul.50-letiya October, 7

engineer

Tel. (4832) 56-02-61

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК687.022

Г.Д. ГУЩИНА, Н.А. ДЕМИДОВА, Ю.Н. НЕКРАСОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТКАНЬ ДЛЯ СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Использование теплового воздействия, в частности инфракрасного излучения, для ускорения ликвидации остаточных деформаций, возникающих при подготовке ткани для раскроя.

Ключевые слова: остаточная деформация, релаксация, тепловое воздействие.

Поступающая в настил ткань имеет остаточную деформацию, полученную в результате намотки ее с натяжением в пределах до 300г/см и последующего хранения в рулонах более суток. Эти деформации относятся к высокоэластическим с большим периодом релаксации. Детали, вырезанные из такого настила с течением времени или в процессе влажно-тепловой обработки, теряют форму и становятся короче. Для ускорения процесса релаксации можно использовать тепло. Для определения эффективности такого способа воздействия на ткань в лабораторных условиях были проведены экспериментальные работы на образцах ткани.

Вырезанные образцы ткани арт. 23334 «С» 2200х250 мм наматывались на скалку диаметром 30 мм в рулон с усилием намотки 200г/см, имитируя намотку ткани при разбраковке. Т.к. концы образца закрепляются жестко, то для дальнейшего наблюдения отмечалась длина образца 2000 мм (по 100 м на закрепление). Образцы ткани оставлялись на отлежку в течение двух суток. После отлежки разматывались два контрольных образца и расстилались в свободном состоянии на столе.

Длина отмеченной части образцов составляла 2052 мм.

Один образец оставался в таком состоянии в течение суток, после чего его длина составляла 2010 мм, т.е. остаточная деформация составляла 10 мм.

Второй образец протягивался по поверхности гладильной подушки со скоростью 15 м/мин без дополнительного прижима. Ширина подушки – 100 мм, температура гладильной поверхности – 60^оС.

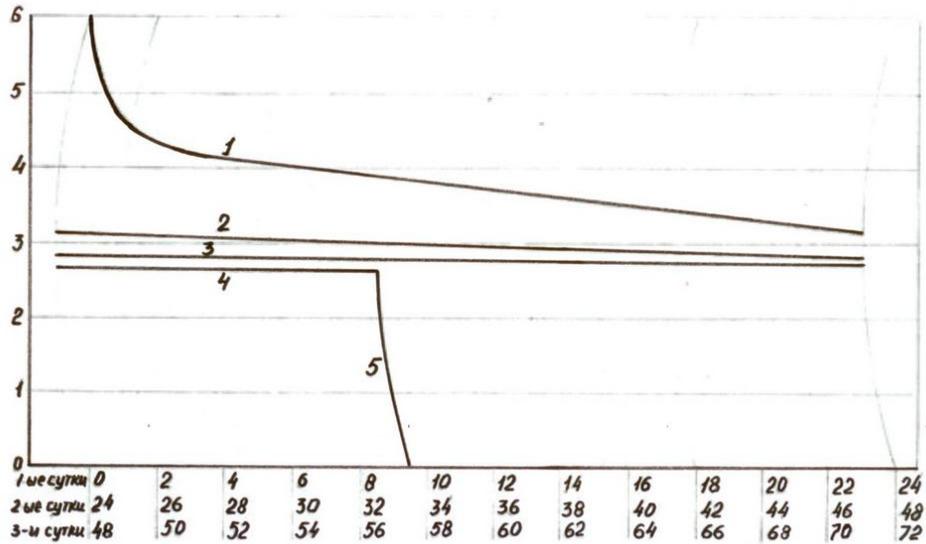
Длина образца после такой тепловой обработке составляла 1994 мм, т.е. на 6 мм короче отмеченной длины. Это означает, что выбранный образец уже имел предварительную деформацию, которая восстановилась только после теплового воздействия. Полученные результаты показывают, что в случае использования такого способа релаксации тканей в процессе настила, потребуется увеличить время контакта ткани с подушкой, температуру подушки или усилие контакта.

Установка гладильной подушки на настилочной машине обеспечит релаксацию ткани. Она должна быть закреплена таким образом, чтобы при останове или торможении машины контакт с тканью не происходил. В противном случае будет происходить опаливание ткани. Это усложнит конструкцию настилочной машины. С целью упрощения конструкции были проведены эксперименты по возможности использования инфракрасных излучателей.

В качестве излучателя использовалась лампа КГ 220-1000-3. Испытываемый образец ткани перемещался под лампой на расстоянии 30 мм. Деформация снималась полностью при скорости перемещения полотна около 6 м/мин. Эту скорость можно увеличить до скорости настилочной машины путем установки отражателя на лампу, уменьшения зазора между тканью и лампой и за счет набора ламп в группу.

Наглядное представление о релаксации тканей показывает рисунок 1, полученный с помощью специального прибора, разработанного авторами, для определения релаксационных свойств различных тканей. Конструкция прибора представлена схемой (рис. 2).

Удлинение в мм.



Время в час.

Рисунок 1 – График релаксации ткани арт. 23334 «С»

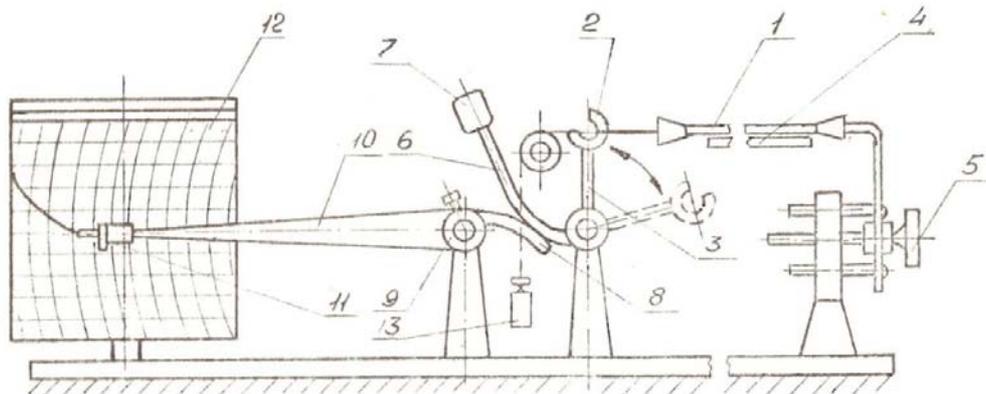


Рисунок 2 – Схема прибора для определения релаксационных свойств ткани

Испытываемый образец ткани 1 размерами 250x40 мм, заправляется в зажимы 2 и устанавливается на площадке 3 прибора таким образом, чтобы расстояние между зажимами составляло 200 мм. Один конец образца через зажим нагружается грузом 4 и остается в течение определенного времени для фиксации деформации. Стержень 5 с крючком 6 в это время отведен вниз, как показано на рисунке 2 пунктиром. После снятия груза упругие деформации исчезают мгновенно. Остаточные высокоэластические деформации, которые исчезают медленно, записываются данным прибором. Для этого освободившийся конец полотна заправляется в крючок 6 стержня 5 и с помощью регулировочного винта 7 ткань устанавливается в такое положение, когда стержень 5 через большую дугу 8 с противовесом 9 и малую дугу 10 не выведут стрелку 11 с пером 12 в исходное (начало записи) положение. Включается часовой механизм барабана 12 и на бумажной ленте получается непрерывная запись изменения остаточной высокоэластической деформации. Истинная величина релаксации определяется путем тарирования бумажной ленты с помощью шкалы делений на площадке 3.

На рисунке 1 представлена запись релаксации образца ткани арт. 23334 «С». Образец с отмеченным участком длиной 200 мм нагружался грузом 800 г и в течение одних суток находился под грузом. Длина участка под грузом составляла 211 мм. После снятия груза его длина составила 206 мм, т.е. величина упругой деформации составила 5 мм, а высокоэластической деформации – 6 мм.

Эксперименты показали, что для ускорения ликвидации остаточных деформаций, возникших в процессе подготовки ткани к настиланью, целесообразно использовать тепловое воздействие, в частности инфракрасное излучение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики [текст] Г.И. Марчук / М. Наука – 1989 – 108 с.
2. А.с. 835736 Устройство для резки волокнистого материала / В.Ф. Абрамов, В.Н. Соколов, А.И. Комисаров, В.В. Карамышкин и др. // Бюл. изобр. – 1981. – № 21.
3. Некрасов, Ю.Н. Технология и оборудование подготовки производства швейных изделий / Ю.Н. Некрасов – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 180 с.

Гущина Галина Дмитриевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Демидова Наталья Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Некрасов Юрий Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
Тел.: (4862) 55-11-20
E-mail: tikshi@ostu.ru

G.D. GUSCHIN, N.A. DEMIDOVA, Y.N. NEKRASOV

**RESEARCH OF PROCESS OF THERMAL ACTION
UPON FABRIC FOR RESIDUAL DEFORMATION ELIMINATION**

Thermal action is used, in particular, infrared radiation, for the accelerated elimination of residual deformations arising at fabric preparation for cutting.

Key words: residual deformation, relaxation, thermal action.

BIBLIOGRAPHY

1. Marchuk, G.I. Metody vychislitel'noj matematiki [tekst] G.I. Marchuk / M. Nauka – 1989 – 108 s.
2. A.s. 835736 Ustrojstvo dlja rezki voloknistogo materiala / V.F. Abramov, V.N. Sokolov, A.I. Komisarov, V.V. Karamyshkin i dr. // Bjul. izobr. – 1981. – № 21.
3. Nekrasov, Ju.N. Tehnologija i oborudovanie podgotovki proizvodstva shvejnyh izdelij / Ju.N. Ne-krasov – Orel: OrelGTU, 2005. – 180 s.

Gushchina Galina Dmitrievna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Senior teacher of department “Technology and design of garment”
Tel.: 4862-55-11-20
E-mail: tiksi@ostu.ru

Demidova Natalya Aleksandrovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”
Tel.: 4862-55-11-20
E-mail: tiksi@ostu.ru

Nekrasov Yury Nickolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, professor of department “Technology and design of garment”
Tel.: 4862-55-11-20
E-mail: tiksi@ostu.ru

УДК 001.981.573:613.646

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, И.В. БОРИСОВА

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ АТТЕСТАЦИИ РАБОЧИХ МЕСТ ПО УСЛОВИЯМ ТРУДА

Оценка охлаждающего воздействия микроклимата на человека проводится путем проведения инструментальных замеров и сопоставлением результатов с нормативными значениями. Довольно часто параметры микроклимата подвержены резкому изменению, особенно при работе на открытом воздухе. В этом случае результаты замеров не позволяют адекватно оценить тепловое состояние человека. Это затрудняет разработку эффективных мер защиты. Авторами предлагается математическая модель для оценки тепловых состояний человека. Результаты расчетов позволяют точнее формулировать мероприятия по улучшению условий труда и проводить расчеты теплозащитной одежды.

Ключевые слова: микроклимат, аттестация рабочих мест по условиям труда, теплообмен.

Условия работы в различных отраслях промышленности сопряжены с возможностью воздействия на человека охлаждающего микроклимата окружающей среды. Комплекс природных и производственных факторов, влияющих на теплообмен организма с окружающей средой широк. Основными среди них являются: температура, влажность, ветер, инсоляция и т.д. Воздействие каждого фактора в отдельности, или их комбинаций приводит к избыточной теплоотдаче. Численное значение дефицита тепла, обусловленного негативным воздействием, определяется по уравнению теплового баланса (1) и определяет физиологическое состояние человека:

$$M + R = \sum Q \pm D \quad (1)$$

где M – метаболические тепловыделения, $Вт$;

R – тепло, получаемое человеком извне, $Вт$;

$\sum Q$ – теплоотдача человека;

D – дефицит тепла, $Вт$.

Для прогнозирования тепловых состояний человека на основе уравнений теплового баланса используются численные модели. Например, «Physiological model of the human thermal system» [7].

В России, оценка негативного влияния микроклимата на человека проводится путем проведения инструментальных замеров и сравнения результатов с нормативными значениями, установленными рядом нормативных документов [1,5,6].

При выполнении ГРАНТ РФФИ № 09-08-97557 на проект «Моделирование процессов тепло- и массообмена в биотехнической системе "Человек-одежда-окружающая среда», авторами создана численная модель прогнозирования теплоотдачи человека для условий охлаждающего климата. Уравнение теплового баланса для охлаждающего климата принимает вид:

$$M + E \cdot F = Q_{ек} + Q_{вк} + Q_{луч} \pm D \quad (2)$$

где E – интенсивность солнечного облучения, $Вт/м^2$;

$Q_{ек}$ – теплоотдача естественной конвекцией, $Вт$;

$Q_{вк}$ – теплоотдача вынужденной конвекцией, $Вт$;

$Q_{луч}$ – теплоотдача излучением, $Вт$;

F – площадь поверхности тела человека, $м^2$.

Как видно из уравнения, теплоотдача человека осуществляется посредством естественной и вынужденной конвекции, теплового излучения. Теплопродукция человека обусловлена метаболическими выделениями и поступлением тепла извне.

Теплоотдача за счет свободной конвекции протекает при движении нагретых и холодных воздушных слоев, имеющих различную плотность. Интенсивность свободноконвективного движения оценивается по критерию Грасгофа (3):

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t_{нов} - t_{окр}) \quad (3)$$

где β – коэффициент объемного расширения воздуха, K^{-1} ;
 g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ;
 L – характерный размер тела, м;
 ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, m^2/c ;

Из-за различных скоростей движения в разных местах потока воздуха, в нем возникают силы вязкого трения. Эти силы стремятся уравнять скорость течения в потоке, за счет передачи импульса от слоев, движущихся быстрее, к слоям, движущимся медленнее. Работа этих сил оценивается коэффициентами кинематической (4) и динамической (5) вязкости:

$$\nu = \frac{g \cdot \mu}{\gamma} \quad (4); \quad \mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{c}{273} \sqrt{\frac{T_{возд}}{273}}}{1 + \frac{c}{T_g}} \quad (5)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/c^{-1} ;
 μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, $кг \cdot c/m^2$;
 γ – плотность воздуха, $кг/m^3$;
 $\mu_0 = 174 \cdot 10^{-8}$,
 $c = 114$ – постоянные.

А.В. Нестеренко предложена математическая зависимость плотности воздуха от его температуры (T_b , К), барометрического давления (P_b , мм. рт.ст.) и влагосодержания (6) [3]:

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{T_g} \left(\frac{P_b}{760} - 0,378 \frac{P_{нп}}{760} \right) \quad (6)$$

где $P_{нп}$ – давление насыщенного пара, мм рт.ст:

$$P_{нп} = 10^{\frac{156+8,12t_{окр}}{236+t_{окр}}} \quad (7)$$

В случае естественноконвективного движения, критерий Нуссельта рассчитывается по значениям критериев Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr) (8):

$$Nu = c \cdot Ra^n = c(Gr \cdot Pr)^n \quad (8)$$

где c, n – коэффициенты,

Pr – критерий Прандтля.

На основе уравнения (8) рассчитываются коэффициент естественноконвективного теплообмена ($\alpha_{ек}$) и теплоотдача ($Q_{ек}$) (9, 10):

$$\alpha_{ек} = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad (9); \quad Q_{ек} = \alpha_{ек} (t_{нов} - t_{окр}) \quad (10)$$

где L – рост человека, м;

λ , – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

Коэффициент теплопроводности воздуха находится в линейной зависимости от температуры, которая может быть выражена формулой (11):

$$\lambda = 8t_{окр} \cdot 10^{-5} + 0,0243 \quad (11)$$

Интенсивность вынужденноконвективной теплоотдачи от тела человека может быть оценено по полуэмпирической формуле (12):

$$Q_{ек} = \gamma \cdot \nu \cdot c_{ов} \cdot F_{нов} (t_{нов} - t_{окр}) \quad (12)$$

где ν – скорость движения воздуха, м/с;

$F_{пов}$ – площадь поверхности тела, обдуваемая ветром, m^2 ;

$c_{вв}$ – теплоемкость влажного воздуха, $кДж/(кг \cdot K)$.

Теплоемкость влажного воздуха ($c_{вв}$) определяется по формуле (13):

$$c_{вв} = c_{с} + c_{п} \frac{d}{1000} \quad (13)$$

где $c_{с}$ – теплоемкость сухого воздуха ($0,24$ ккал/(кг·°C));

$c_{п}$ – теплоемкость водяного пара ($0,43$ ккал/(кг·°C));

d – влагосодержание влажного воздуха г/кг (14):

$$d = \frac{\varphi \cdot P_{нп}}{P_{б} - \varphi \cdot P_{нп}} \quad (14)$$

где $P_{б}$ – барометрическое давление, мм. рт. ст.;

$P_{нп}$ – давление насыщенного пара, мм. рт. ст.;

φ – относительная влажность воздуха, %.

Величина относительной влажности воздуха определяется по показаниям аспирационного психрометра (15, 16) [3]:

$$\varphi = P_{нп} - \frac{A \cdot P_{б} (P_{нп} - P_{св})}{P_{св}} 100\% \quad (15)$$

$$A = 10^{-6} \frac{65+6,75}{v_{асп}} \quad (16)$$

где A – коэффициент аспирации;

$P_{св}$ – давление сухого воздуха, мм. рт. ст.,

$v_{асп}$ – скорость аспирации, м/с.

В случае охлаждающего климата, большой вклад в общую величину теплоотдачи вносит лучистая составляющая, интенсивность которой (17):

$$Q_{луч} = \varepsilon \delta \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] F_{нов} \quad (17)$$

где ε – степень черноты излучающей поверхности,

δ – постоянная Стефана-Больцмана, $Вт/(m^2 \cdot K)$;

$T_{пов}$; $T_{окр}$ – абсолютное значение температур поверхности тела человека и окружающей среды, K;

$F_{пов}$ – площадь поверхности тела человека, m^2 .

Как видно, для определения теплообмена излучением, необходимо знать площадь поверхности тела, которая имеет сложную геометрическую форму. Площадь тела может быть определена по формулам Дюбуа (18); Мостеллера (19); Тахакиры (20); Гехана (21); Бойда (22); Фудзимото (23):

$$F_{нов} = \frac{m^{0,425} \cdot h^{0,725}}{139,2} \quad (18); \quad F_{нов} = \sqrt{\frac{m \cdot h}{3600}} \quad (19); \quad F_{нов} = 0,007241 h^{0,725} \cdot m^{0,425} \quad (20)$$

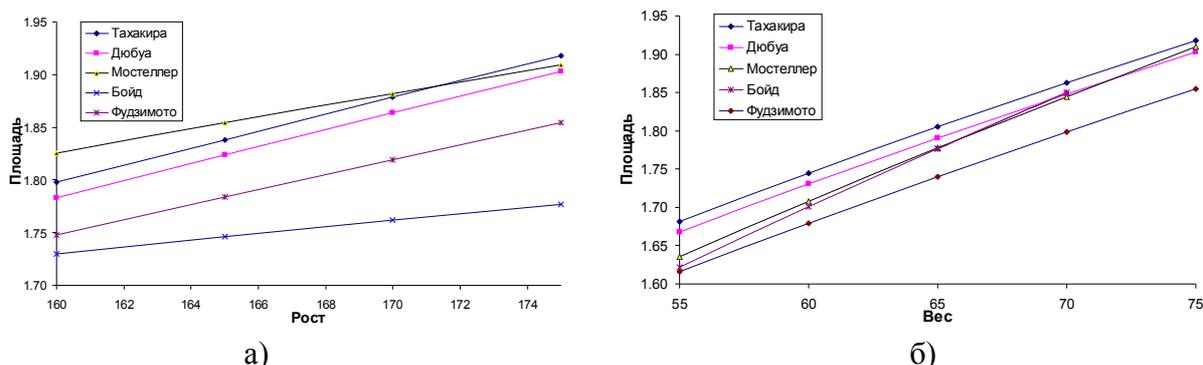
$$F_{нов} = 0,0235 m^{0,51456} \cdot h^{0,42246} \quad (21); \quad F_{нов} = 0,0003207 \cdot m^{(0,7285-0,0188 \cdot \lg(m))} \cdot h^{0,3} \quad (22);$$

$$F_{нов} = 0,008883 h^{0,663} \cdot m^{0,444} \quad (23)$$

где: m – масса, кг (в формуле Бойда, г); h – рост человека, см.

Формулы дают значительный разброс в результатах расчетов как при фиксированной массе (рис. 1а), так и при фиксированном росте (рис. 1б).

На основе соотношений (1-23), авторами предложена математическая модель прогнозирования теплоотдачи человека. Для ее реализации авторами использовалась среда разработки и исполнения приложений Lab View.



а) б)
Рисунок 1 – Результаты расчета площади тела человека для фиксированного веса $m=75$ кг (а) и роста $h=175$ см (рисунок б)

Благодаря собственной измерительной системе Lab View является средой разработки виртуальных приборов (ВП) - гибких инструментов, позволяющих проводить сбор и анализ данных с подключенных устройств. Лицевая панель ВП, разработанного авторами представлена на рисунке 2.

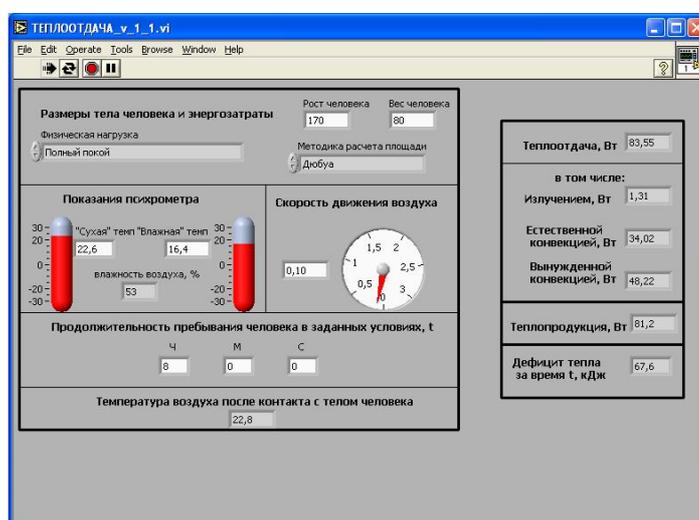


Рисунок 2 – Лицевая панель численной модели для определения параметров теплоотдачи человека

Исходными данными для расчетов являются: масса и рост человека; показатели тяжести труда, замеры параметров микроклимата. Модель рассчитывает составляющие теплоотдачи и величину дефицит тепла. Проверка адекватности модели проводилась авторами на основе среднесменных значений параметров микроклимата, измеренных при проведении аттестации рабочих мест на предприятиях Орловской области (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты замеров параметров микроклимата

Рабочее место	Дата замера	Кат. тяж-ти	Результаты замеров			Класс условий труда	Время воздействия, %
			t, °C	φ, %	v, м/с		
Столяр	10.02.10	II б	16,0	40	0,03	2.0	100
Волочилыщик проволоки	17.11.09	II а	9,5	50	0,11	3.4	30
Корректировщик ванн	17.11.09	II б	14	27	0,06	3.1	50
Аппаратчик химводоочистки	17.11.09	II а	15,5	36	0,04	3.1	10
Мастер волочильного участка	16.04.10	II б	13,6	44	0,08	3.1	30
Волочилыщик металлов	16.04.10	II б	13,6	44	0,08	3.1	30
Каменщик	10.03.10	II б	-8,2	40	0,03	3.1	100

Расчет параметров теплоотдачи проводились на примере человека ростом 178 см и массой 80 кг. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования параметров теплоотдачи человека

Рабочее место	Q _{ек} , Вт	Q _{вк} , Вт	Q _{луч} , Вт	D, кДж
Столяр	58,1	13,1	1,9	-5,2
Волоочильщик проволоки	93,2	112	2,7	93,2
Корректировщик ванн	71,8	360	2,2	25,8
Аппаратчик химводоочистки	65	157,6	2,03	0,78
Мастер волоочильного участка	73,3	174,2	2,27	4,6
Волоочильщик металлов	73,6	266	2,27	16
Каменщик	186	295	4,2	66,7

Как видно из полученных результатов, на рабочем месте «Столяр», человек находится в состоянии теплового комфорта (избыток тепла составляет 5,2 кДж). На рабочих местах «Аппаратчик химводоочистки», «Мастер волоочильного участка», «Волоочильщик металлов», формируется охлаждающий микроклимат. Величина дефицита тепла не превышает 20 кДж, что не приводит к подключению механизмов терморегуляции и снижению производительности труда [2]. Не смотря на это, условия труда по фактору «микроклимат» относятся к классу 3.1.

На рабочих местах «Корректировщик ванн», «Волоочильщик проволоки», «Каменщик», величин дефицита тепла не превышает 100 кДж за время смены. Степень охлаждения человека незначительная при использовании теплозащитной одежды [2]. Такое негативное влияние не приводит к развитию профессиональных патологий. В то же время, условия труда на рабочем месте «Волоочильщик проволоки», относятся к классу 3.4. Т.е., согласно современным представлениям, пребывание в таких условиях на протяжении рабочей смены может привести к развитию выраженных форм холодовых заболеваний.

Как видно, сравнение результатов измерений параметров микроклимата с нормативными значения не всегда позволяет адекватно оценить тепловое состояние человека. Использование предложенной авторами численной модели позволит формулировать мероприятия по улучшению условий труда на конкретных рабочих местах и проводить более точные расчеты специальной одежды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Грант № 09-08-97557 на проект "Моделирование процессов тепло - и массообмена в биотехнической системе "Человек – одежда - окружающая среда".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева, Р.Ф. Санитарные нормы микроклимата производственных помещений / Р.Ф. Афанасьева // СПб.: "Полиграфия" – 2000. – 13с.
2. Кошечев, В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода [Текст] / В.С. Кошечев // М: Медицина, - 1981, - 188с.
3. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева // М.: «Энергия», 1973г, 320 с.
4. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.В. Нестеренко // М.: «Высшая школа», 1971г, 460 с.
5. Руководство Р2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. [Текст] / кол. авторов //Спб.: «УВСИЗ», 2005, – 153 с.
6. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст] / Р.Ф. Афанасьева и др. // М.:Госстандарт, 1996г. – 16с.
7. Farrington R.B. Use of a Thermal Manikin to Evaluate Human Thermoregulatory Responses in Transient, Non-Uniform, Thermal Environments [Text] // R.B. Farrington, P.Rugh, Desikan Bharathan, R Burke, - SAE International - 2004, - 8p.

Родичева Маргарита Всеволодовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

Абрамов Антон Вячеславович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Телефон (4862) 76-14-39
E-mail bgdgtu@mail.ru

Борисова Ирина Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Ст. преподаватель кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Телефон (4862) 76-14-39
E-mail bgdgtu@mail.ru

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, I.V.BORISOVA

**SIMULATOR FOR ESTIMATION OF HUMAN THERMAL CONDITIONS
AT WORKPLACE CERTIFICATION BY WORKING CONDITIONS**

The estimation of microclimate cooling effect on a human being is carried out by instrumental measurements and comparison of results with standard values. The microclimate parameters are subject to drastic changes fairly often, especially at work outdoors. In this case the measurement results don't allow estimating a thermal condition of the person adequately. It makes difficult the development of effective methods of protection. The authors offer a simulator for an estimation of human thermal conditions. Results of calculations allow formulating actions for labour conditions improvement and carrying out heat-resisting clothes computations.

Key words: microclimate, workplace certification by working conditions, heat exchange.

BIBLIOGRAPHY

1. Afanas'eva, R.F. Sanitarnye normy mikroklimate proizvodstvennyh pomewenij / R.F. Afanas'eva // SPb.: "Poligrafija" – 2000. – 13s.
2. Koweev, V.S. Fiziologija i gigiena individual'noj zawity cheloveka ot holoda [Tekst] / V.S. Ko-weev // M: Medicina, – 1981, – 188s.
3. Miheev, M.A. Osnovy teploperedachi. [Tekst] / M.A. Miheev, I.M. Miheeva // M.: «Jenergija», 1973g, 320 s.
4. Nesterenko, A.V. Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventiljacji i kondicionirovanija [Tekst] / A.V. Nesterenko // M.: «Vysshaja shkola», 1971g, 460 s.
5. Rukovodstvo P2.2.2006-05. Gigiena truda. Rukovodstvo po gigienicheskoj ocenke faktorov rabochej sredy i trudovogo processa. Kriterii i klassifikacija uslovij truda. [Tekst] / kol. avtorov // Spb.: «UVSIZ», 2005, – 153 s.
6. SanPiN 2.2.4.548-96. Gigienicheskie trebovanija k mikroklimate proizvodstvennyh pomewenij [Tekst] / R.F. Afanas'eva i dr. // M.: Gosstandart, 1996g. – 16s.
7. Farrington R.B. Use of a Thermal Manikin to Evaluate Human Thermoregulatory Responses in Transient, Non-Uniform, Thermal Environments [Text] // R.B. Farrington, P.Rugh, Desikan Bharathan, R Burke, - SAE International - 2004, – 8p.

Rodicheva Margarita Vsevolodovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor, head of department “Technology and design of garment”
Tel.: 4862-55-11-20
E-mail: tiksi@ostu.ru

Abramov Anton Vyacheslavovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor of department “Job safety and environment protection”
Tel.: 4862-76-14-39
E-mail: bgdgtu@mail.ru

Borisova Irina Vicktorovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Senior teacher of department “Job safety and environment protection”
Tel.: 4862-76-14-39
E-mail: bgdgtu@mail.ru

А.А. ТАРАПАНОВ, В.К. ГЛЯНЦЕВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИЗАЙНА МОДЕЛЕЙ И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ КОНСТРУИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ОДЕЖДЫ

Рассматриваются современные подходы в прогнозировании дизайна моделей специализированной одежды. Приводятся данные по повышению эффективности управления параметрами конструирования при автоматизированном формировании моделей.

Ключевые слова: дизайн моделей, параметры конструирования, специализированная одежда.

Современное промышленное производство одежды требует интенсификации процесса проектирования и подготовки новых моделей к производству, обеспечение точности раскроя для получения качественных изделий. Это невозможно без применения инженерных методов и автоматизированного проектирования.

Когда мы говорим об автоматизированном проектировании специальной одежды (спортивной, защитной) так или иначе встает вопрос о координальном изменении требований к проектируемому объекту через 5 – 20 лет. Это предполагает необходимость использовать огромный опыт, накопленный в области прогнозирования прогресса, выделить применяемые аспекты, имеющие существенные значения для выявления всех возможностей в такой сравнительно мало исследуемой области в плане информационных систем как дизайн одежды. Одновременно появляется возможность предотвратить ничем неограниченные дизайнерские фантазии при создании специальной одежды, которая в существенной степени функциональна.

Для выбора подходящих методов можно использовать классификацию подходов к прогнозированию на основе получаемых с их помощью результатов. Важно решить задачу о том дают ли они новую информацию или стимулируют использование этой информацией. Наиболее подходящими в области дизайна является:

- поисковое прогнозирование [1], а также все разновидности формализованных подходов того же направления выполняющие две важные задачи: получение новых данных о будущих решениях и моделирование различных результатов реализации решений;
- структурные методы [1], в основе которых используются «деревья решений», выполняющих также две задачи: выработку новой информации относительно функциональных требований и структурных взаимосвязей и моделирование различных системных структур. «Деревья решений», являясь упорядоченным взглядом, на дизайнерские решения устанавливают иерархические взаимосвязи, по возможности, для всех альтернативных представлений. Фактически «деревья решений» являются системным подходом к использованию всей совокупности уровней иерархии, представляющих ту или иную модель. Это означает, что на каждом уровне должны быть представлены точные идеи-решения, способствующие выполнению конечной цели.

Немалую роль в существенном расширении возможных вариантов может сыграть морфологический подход, широко применяемый при прогнозировании [1].

Одним из самых перспективных направлений является ретроспективный анализ моделей одежды, который в информативном плане содержит как основные направления развития моделей одежды, так и конкретные конструктивные атрибуты проектируемых идей и конструкций [1].

На основе данных за определенный период времени о моделях специализированной одежды, производится анализ элементов конструкции, строится обобщенная структура и разрабатывается методика синтеза новых вариантов. Дальнейшее развитие блока выбора ра-

циональных вариантов общей структуры автоматизированного проектирования [2] представлено в виде декомпозиции (рис. 1).

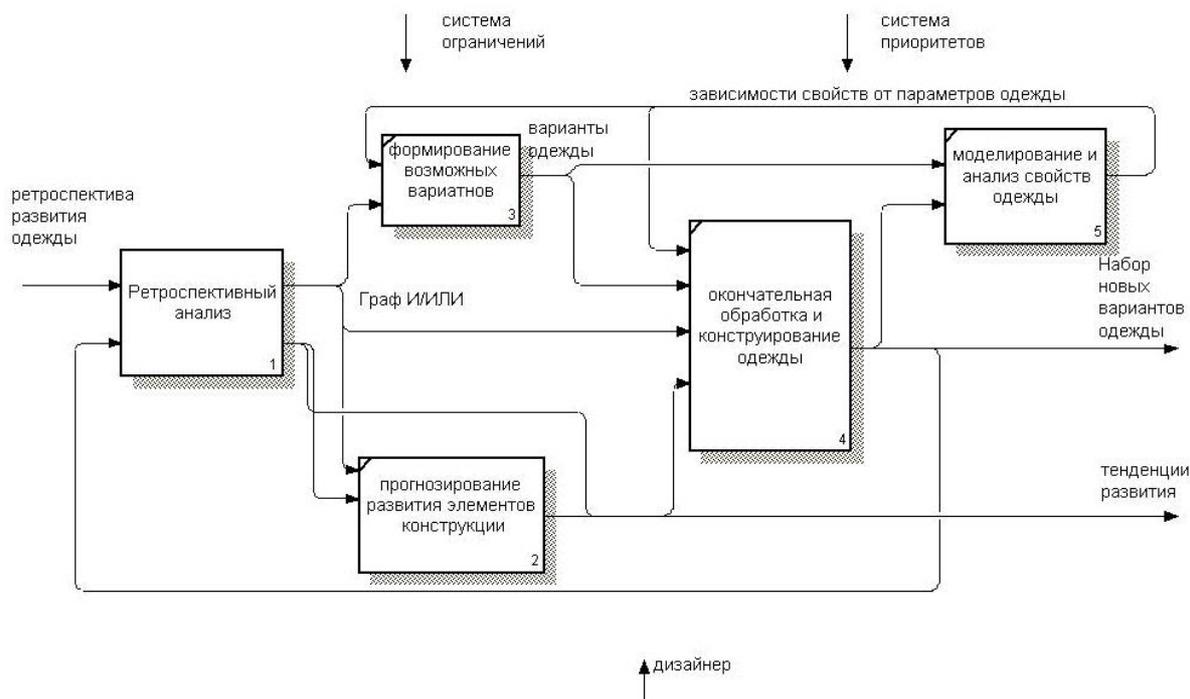


Рисунок 1 – Контекстная диаграмма блока выбора вариантов

Ретроспективный анализ, являясь основой для формирования структурно-функционального представления предметной среды конструирования специализированной одежды, заключается в изучении эволюции дизайна костюма рассматриваемой области. Если выбрать спорт и сформировавшуюся в XXI веке такую популярную игру как теннис, то эволюцию моделей женской одежды можно представить в виде графа (рис. 2).

Модель имеет структурно-функциональное представление и подлежат иерархическому разделению на отдельные элементы и основные взаимосвязи между ними (блоки формирования графа И/ИЛИ и выделение циклов в развитии одежды) (рис. 3). Граф И/ИЛИ полученный на основе вышеуказанного анализа дополняются новыми элементами и связями.

Оперируя данными о возможных тенденциях, набором данных о предполагаемых моделях, дизайнер может принять самое обоснованное решение (рис. 1). Т.к. основной акцент направлен на проектирование специализированной одежды, то принимаемые решения должны удовлетворять определенному набору характеристик. Следует учесть, что часто такие характеристики могут быть взаимоисключающими и поэтому приходится находить их компромиссную комбинацию. Реализовать это можно с помощью различных методов оптимизации, основанных на методах линейного или динамического программирования. Проблема заключается в том, что в большинстве случаев отдельные зависимости слабо формализуемы, имеют нечеткий характер. В этом случае используется опыт и интуиция дизайнера. Система представляет оператору игровую среду с различными параметрами моделей, позволяющую выбрать лучшее сочетание свойств.

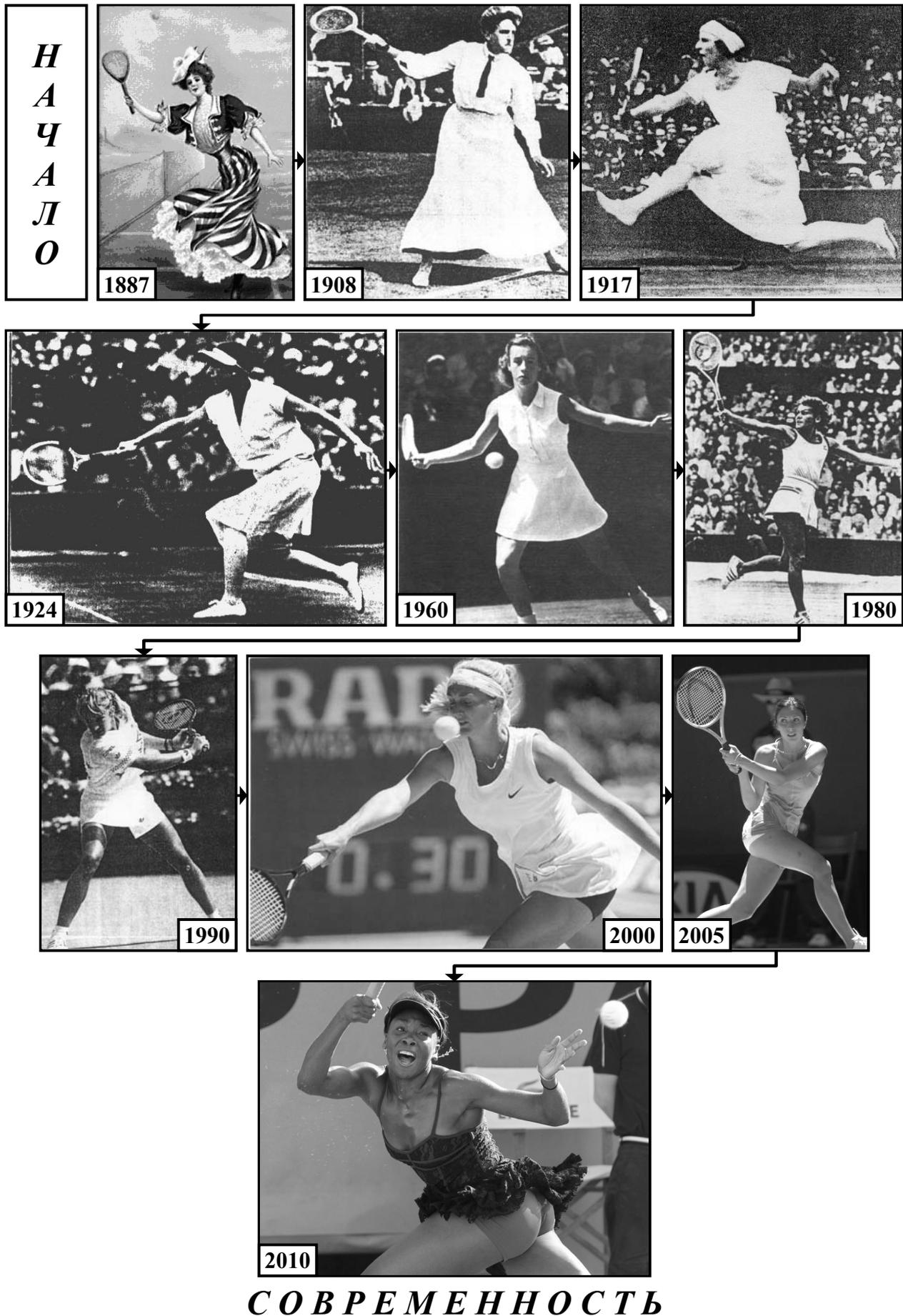


Рисунок 2 – Эволюция моды спортивной женской одежды для игры в теннис

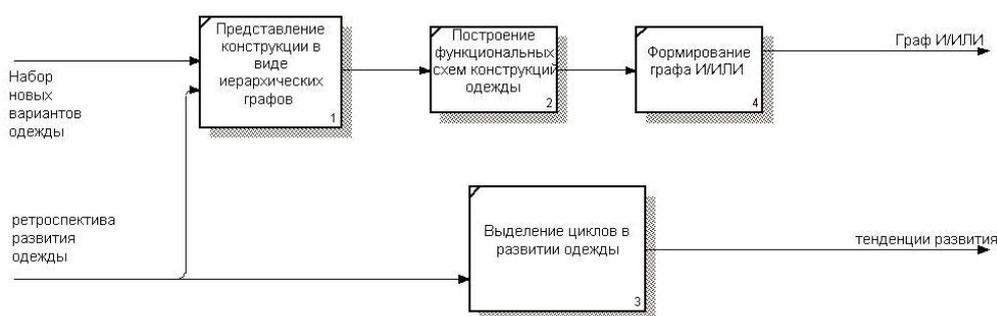


Рисунок 3 – Декомпозиция блока ретроспективного анализа

Результаты моделирования можно использовать как на этапе автоматического формирования моделей одежды, так и на этапе окончательного принятия решений. При автоматическом формировании они являются дополнительными правилами, а при окончательном принятии решений указывают на предполагаемое направление в развитии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некрасов, Ю.Н. Проектирование и технология производства спортивной женской одежды [Текст] / Ю.Н. Некрасов, А.А. Тарапанов. – СПб: Изд-во СПГУДТ, 2004. – 176 с.
2. Тарапанов, А.А. Развитие системы автоматизированного конструирования специализированной одежды [Текст] // Известия ОрелГТУ 2008 №3-5/271(546), С 44 – 48.

Тарапанов Андрей Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Дизайн»
Тел. 8-920-287-8887
E-mail: tarapanov@rambler.ru

Глянцев Валерий Константинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Информационные системы»
Тел. 8-906-648-5714
E-mail: vglyantsov@gmail.com

A.A. TARAPANOV, V.K. GLYANTSEV

MODEL DESIGN PREDICTION AND PARAMETER CONTROL AT DESIGNING SPECIAL CLOTHING

In the paper the modern approaches to forecasting specialized clothes model design are considered. The information for the efficiency increase in design parameter control at a model automated formation are shown.

Key words: design of models, parameters of the designing, the specialized clothes.

BIBLIOGRAPHY

1. Nekrasov, Ju.N. Proektirovanie i tehnologija proizvodstva sportivnoj zhenskoj odezhdy [Tekst] / Ju.N. Nekrasov, A.A. Tarapanov. – SPb: Izd-vo SPGUDT, 2004. – 176 s.
2. Tarapanov, A.A. Razvitie sistemy avtomatizirovannogo konstruirovaniya specializirovannoj ode-zhdy [Tekst] // Izvestija OrelGTU 2008 №3-5/271(546), S 44 – 48.

Tarapanov Andrey Aleksandrovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of technical science, associate professor of department “Design”
Tel.: 8-920-287-8887
E-mail: tarapanov@rambler.ru

Glyantsov Valery Konstantinovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Post-graduate student of department “Information systems”
Tel.: 8-906-648-5714
E-mail: vglyantsov@gmail.com

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 338.2 (075.8):621

С.Р. БОНДАРЕВА

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД В ФОРМИРОВАНИИ КОНКУРЕНТНОЙ СТРАТЕГИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В данной статье автор раскрывает основные составляющие сценарного подхода в формировании конкурентной стратегии машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: сценарный подход, сценарий, конкурентные стратегии, конкурентные преимущества.

Сценарное планирование – это один из наиболее эффективных системных инструментов современного стратегического менеджмента и стратегического анализа. Особенно активно сценарное планирование стало развиваться с начала 90-х годов. Разработка сценариев используется как альтернатива линейному планированию, которое часто показывало свою неэффективность при построении стратегических планов и прогнозов, особенно в период экономической нестабильности.

Главный инструмент сценарного планирования - сценарный анализ. Это метод применяется для стратегического управления процессами с высоким уровнем неопределённости.

Сценарий – это способ анализа сложной среды, в которой присутствует множество значимых, к тому же влияющих друг на друга тенденций[1]. Сценарии позволяют анализировать и планировать нестандартные ситуации.

Одним из первых, кто использовал сценарий для прогнозирования развития сложных систем, был Герман Кан. Он определил сценарий как динамичную последовательность возможных событий, фокусирующее внимание на причинно-следственной связи между этими событиями и точками принятия решений, способных изменить их ход и траекторию движения во времени всей рассматриваемой системы в целом или отдельных её подсистем[1].

Написание сценария осуществляется на основе ситуационного анализа и является начальным этапом процесса прогнозирования, в ходе которого формируются возможные альтернативы развития объекта прогнозирования. Метод сценариев даёт возможность оценить наиболее вероятный ход событий и возможные последствия. Он предназначен для выделения ключевых моментов развития исследуемого объекта и разработка на этой основе качественно различных вариантов его динамики, а также для всестороннего анализа и оценки каждого из полученных вариантов, изучения его структурных особенностей и возможных последствий их реализации.

Одним из преимуществ сценарного подхода является то, что его разработка предполагает детальное описание прогнозного фона, объекта прогнозирования, выявление и оценку взаимосвязей, причин и следствий. Сценарный подход может применяться к анализу системы, её элементов, а к анализу воздействия среды на систему.

Метод сценариев предполагает создание технологий разработки сценариев, обеспечивающих более высокую вероятность выработки эффективного решения в тех ситуациях, когда это возможно, и более высокую вероятность сведения ожидаемых потерь к минимуму в тех ситуациях, когда потери неизбежны.

В настоящее время известны различные реализации метода сценариев, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Методы реализации сценариев

№ п/п	Название метода	Характеристика метода	Преимущества	Недостатки
1	Метод получения согласованного мнения	Является вариантов реализации метода Дельфи, ориентированный на получение коллективного мнения различных групп экспертов относительно крупных событий в той или иной области в заданный период будущего	Формируется общий взгляд на развитие определённых событий и ли процессов	Недостаточно в полной степени учитывается взаимозависимость и взаимодействие между факторами, не всегда учитывается динамика развития ситуаций
2	Метод повторяющегося объединения независимых сценариев	Характеризуется сопоставлением независимых сценариев по каждому из аспектов, оказывающих существенное влияние на развитие ситуации и дальнейшее согласование сценариев развития различных аспектов ситуации	Углубленный анализ взаимодействия различных аспектов развития ситуации	Слабая разработанность и методическая обеспеченность процедур согласования сценариев
3	Метод матриц взаимовлияний	Предполагает определение на основании экспертных оценок потенциального взаимовлияния событий рассматриваемой совокупности	Оценки, связывающие все возможные комбинации событий по силе, распределению по времени позволяют уточнить первоначальные оценки вероятностей событий и их комбинации	Трудоёмкость получения большого количества оценок и корректной их обработки
4	Метод Абта и Фостера	Данный метод предусматривает отбор только тех переменных, которые имеют непосредственное отношение к анализируемой системе	Даёт более глубокое понимание ситуации и предлагает систему воздействий, которая может изменить рассмотренные сценарии развития	Неоправданное увеличение числа переменных затрудняет возможность анализа ситуации, в тоже время излишнее их обобщение затрудняет проведение анализа

Таким образом, вышерассмотренные методы при разработке сценария позволяют лучше понять проблему. Кроме этого для разработки сценариев применяют корреляционный анализ, экстраполяции трендов, экспертный, качественный анализ и т.д.

Сценарный подход как инструмент стратегического менеджмента может использовать при определении направлений разработки конкурентной стратегии на машиностроительных

предприятиях. Для разработки сценария развития отрасли и предприятий отрасли могут быть использованы три уровня сценариев:

1 уровень – глобальные сценарии

2 уровень – сценарии развития страны-России

3 уровень – сценарии развития отрасли и предприятий отрасли машиностроения

Согласно первому уровню (глобальные сценарии) возможны два пути:

- *сценарий А* (все вернётся на круги свои) характеризуется следующими чертами: роль мировых денег по-прежнему будет играть доллар США; главным товаром будет как и была нефть. Нефтепродукты останутся инструментом концентрации значительных финансовых ресурсов в бюджетах отдельных компаний и государств. Использование этих средств для финансирования различных сфер деятельности сохранится; господствующей в экономической политике ведущих мировых держав останется идеология либерализма, но регулирующая роль государственных органов, особенно в сфере финансов возрастёт; приоритеты экономической политики развитых стран и крупных компаний по-прежнему будут сосредоточены на решение текущих задач. Таким образом, уровень инновационности экономики будет недостаточно высоким.

- *сценарий В* (мир станет принципиально иным) характеризуется: доллар США перейдёт в разряд региональных валют, подобно евро; нефть потеряет свою уникальность и будет преодолена моноцентричность мировой финансово-экономической системы, которая обусловила высокую неустойчивость протекающих в ней процессов; мировая экономическая система станет более диверсифицированной, устойчивой и предсказуемой; роль научно-технического прогресса, экономики знаний, инноваций станет гораздо больше, затраты на НИОКР достигнут 3-4% мирового ВВП (в странах-лидерах – 10%), значительно вырастет государственная поддержка инновационной системы»[6]

На основании этих сценариев и учёта мировых тенденций возможны следующие сценарии *развития России – это будет второй уровень сценарного развития*. Развитие России может пойти по широкому спектру траекторий.

Сценарий А - инерционный. Серьезных изменений отраслевых и территориальных пропорций к концу 20-х годов XXI века не произойдёт: доля добывающего сектора в совокупном выпуске будет следовать мировым тенденциям, т.е. сократиться с нынешних 12% до 8-9%. При таком развитии событий страна сохранит позиции «средняка».

Сценарий ВА – катастрофический. Снижение значения энергетических и других природных ресурсов при пассивной роли государства значительно ухудшит позиции российской экономики. Темпы роста сократятся до среднемирового уровня (3-4% среднегодового прироста ВВП), макроотраслевые пропорции к середине 20-х годов XXI века останутся прежними. Объёмы добычи и экспорта нефти и газа будут сокращаться. Не все проекты будут реализованы.

Сценарий ВВ – инновационный. «Российское правительство будет стимулировать экономический рост, в результате чего доля накоплений в ВВП вырастет с 18-19% до 25-40% (в Китае этот показатель превышает 40%). Востребованность НИОКР, связанных с технологическим обновлением, обеспечит рост затрат на НИОКР по отношению к ВВП до 3-4% (4-5 раз). Доля высокотехнологичных, наукоемких производств, инновационно активных предприятий будет достигать 25-40%.[6]. Среднегодовые темпы прироста ВВП в этом сценарии составят 5-7%, при сокращении добывающего сектора на 5-6 %. По масштабам экономики Россия войдёт в пятёрку стран лидеров, по уровню экономического развития, измеренному душевым производством ВВП, - поднимется на достаточно высокий уровень.

Таким образом, сконструированные сценарии экономического развития России выстраиваются в определённую последовательность: катастрофический, инерционный, инновационный. Важнейшим фактором перехода к более предпочтительному сценарию развития является усиление инновационной составляющей экономической системы.

Анализ экономической ситуации в экономике страны в 2009 – 2010 году показал, что в связи с мировым финансовым кризисом, экономика России тоже оказалась под его влиянием. В результате значительно ухудшилось финансовое положение предприятий, поскольку издержки производства не сократились в той же степени, в какой упал спрос, выпуск про-

дукции услуг и выручка от их реализации. Инвестиции в основной капитал незначительные. В 2010 году сценарии развития экономики России различаются: во-первых, и доступности кредитных ресурсов, которые во многом определяют различные уровни потребительской и инвестиционной активности, и, во-вторых, перспективами изменения эффективности и конкурентоспособности экономики. В 201-2012 гг. основные различия сценариев заключаются в подходах к модернизации экономики и политике «выхода из кризиса», включая бюджетные и монетарные параметры.

«Консервативный сценарий (1) предполагает стагнацию экономики в следствие сжатия государственного спроса по мере завершения антикризисных программ, ограничение банковского кредитования вплоть до 2011-2012 гг. и невысокий уровень инвестирования в инфраструктурных отраслях. В условиях действия указанных факторов рост ВВП составит 100,9% в 2010 г, 101,1% в 2011 г, 103,1- в 2012.

Умеренно-оптимистичный сценарий (2) предусматривает оживление экономики вследствие роста реального объёма кредитования, повышение эффективности и конкурентоспособности бизнеса. Умеренный рост кредитования 2010 года будет способствовать восстановлению потребительского спроса, и осуществлению модернизации предприятий. В 2011-2012 гг. предполагается реализовать комплекс программ и преобразований, направленных на значительное повышение эффективности здравоохранения. Образования, сферы науки и технологий, развитию транспортной инфраструктуры. Рост ВВП составит в 2011-103%, в 2012-104,3%.»[9]. Данный сценарий был положен в разработку параметров федерального бюджета на 2010-2012., кроме того основные положения данного сценария легли в основу комплексной конкурентной стратегии России, состоящей из нескольких направлений: развитие рыночных механизмов, модернизация технологической базы экономики, стимулирование инновационного процесса и тесно связанные с этим направлением, развитие ИКТ, повышение качества трудовых ресурсов.

В соответствии с вышерассмотренными сценариями переходим к **третьему уровню сценариев - сценарии развития отрасли и предприятий отрасли (на примере отрасли машиностроения)**

Для того чтобы предложить сценарии развития данной отрасли необходимо рассмотреть общие тенденции характерные для отрасли. В 2009-2010 гг. машиностроительный комплекс, к которому относится производство машин и оборудования, транспортных средств и оборудования, электрооборудования, электронного и оптического оборудования, испытывал наиболее тяжёлое состояние среди секторов промышленности кризисное сжатие производства (на 43,2%). Отечественный сектор машиностроения отстаёт по уровню развития от стран Западной Европы, США и Японии. Удельный вес отрасли в структуре промышленного производства составляет 20%, в то время как в экономически развитых странах он достигает 35-50%. Основу сектора составляет автомобилестроение (обеспечивает 50% выручки и прибыли сектора)- в развитых странах основной оборот приходится на производителей высокотехнологичного оборудования. Машиностроительная продукция в основном ориентирована на внутренний рынок.

Основными причинами кризисного состояния российского машиностроения являются:

- наличие в отечественном машиностроении значительного количества устаревших производств, не способных производить в необходимых масштабах продукцию, соответствующую современным укладам;
- преобладание технологий четвёртого уклада, ограниченная востребованность технико-технологических достижений последующих укладов;
- низкий спрос на отечественную продукцию;
- кадровые ограничения. Почти на половине предприятий машиностроения наблюдается острый дефицит квалифицированных кадров;
- слабая защищённость российских предприятий от недобросовестной конкуренции со стороны импортных производителей;
- ограниченность собственных денежных средств;
- недостаточность законодательных и нормативных документов, стимулирующих инновационную деятельность;

– низкий инновационный потенциал организаций. Иновации в России не востребованы бизнесом. «Реализуется всего 8-10% инновационных идей и проектов(в США -82%, в Японии -95%).Разработку и освоение иноваций осуществляет немногим более 10% предприятий машиностроительного комплекса. Для сравнения в США средний показатель инновационной активности- около 30%[2]».

– недостаточная финансовая поддержка государства. На приобретение новых технологий расходуется не более 15% всех средств, затрачиваемых на иновации, в основном закупается импортное оборудование.

– низкий уровень инвестиций в данную отрасль. «В результате опроса, проведенного в 2005г. одним международным консалтинговым агентством оказалось лишь 3% зарубежных инвесторов испытывают интерес к России как к месту проведения научных исследований, технологического сотрудничества и инновационной деятельности. 79% рассматривают Россию в качестве рынка сбыта товаров и услуг»[7].

– плачевное состояние отраслевой и межотраслевой кооперации. На данном этапе кооперация практически рухнула, утрачены связи, технологические мощности, трудовой потенциал предприятия.

Таким образом, исходя из представленной ситуации в отрасли машиностроения и с учетом сценариев первого и второго уровня сценариев - развитие предприятий отрасли и самой отрасли может происходить по следующим сценариям:

Инерционный сценарий – разработанный на основе экстраполяции. В основе инерционного пути развития лежит анализ прошлых лет и соответственно продление их в будущем. Этот путь развития основан частично на основных конкурентных преимуществах (ресурсы) и частично искусственно-созданных (технологические).

Данный сценарий обеспечит:

- снижение конкурентоспособности отрасли и предприятий;
- отсутствие сдвигов и инвестиционном климате;
- падение спроса на отечественную продукцию машиностроения
- дальнейшее падение производительности труда.

Иновационный сценарий, основанный на внедрение и развитие конкурентных преимуществ искусственно-созданных, которые сохраняются длительное время и обеспечат конкурентоспособность отрасли и предприятий отрасли, будут способствовать росту производительности труда в отрасли.

Данный сценарий обеспечит:

- повышение конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения;
- повышение инновационной активности;
- модернизацию отрасли и предприятий;
- подготовку специалистов с новым качеством знаний;
- развитие НИОКР и сокращение сроков их внедрения;
- развитие отраслевой и межотраслевой кооперации.

Отечественное машиностроение – это важнейшая отрасль, обеспечивающая переход экономики страны к прогрессивным технологическим укладам. Поэтому инновационный сценарий больше подходит для отрасли машиностроения. Предложенные автором статьи сценарии развития машиностроения оказывают влияние на разработку вариантов конкурентной стратегии предприятий отрасли с учётом сложившейся ситуации.

Специалист в области управления М.Портер отмечает, что «согласование сценариев со стратегий может осуществляться несколькими способами, но при этом необходимо помнить, что построение стратегии на базе только одного из сценариев достаточно рискованно. Выбор стратегии, предусматривающей все возможные сценарии развития, если и возможен, то требует значительных издержек[3]». В нашем случае лучшей конкурентной стратегий будет комплексная конкурентная стратегия, основанная на комбинации конкурентных преимуществ, имеющихся в отрасли, так и конкурентных преимуществ отдельно взятой организации.

Сценарный подход играет особую роль при разработке алгоритма, обеспечивающего формирование конкурентной стратегии машиностроительного предприятия. Алгоритм формирование конкурентной стратегии представлен на рисунке 1.

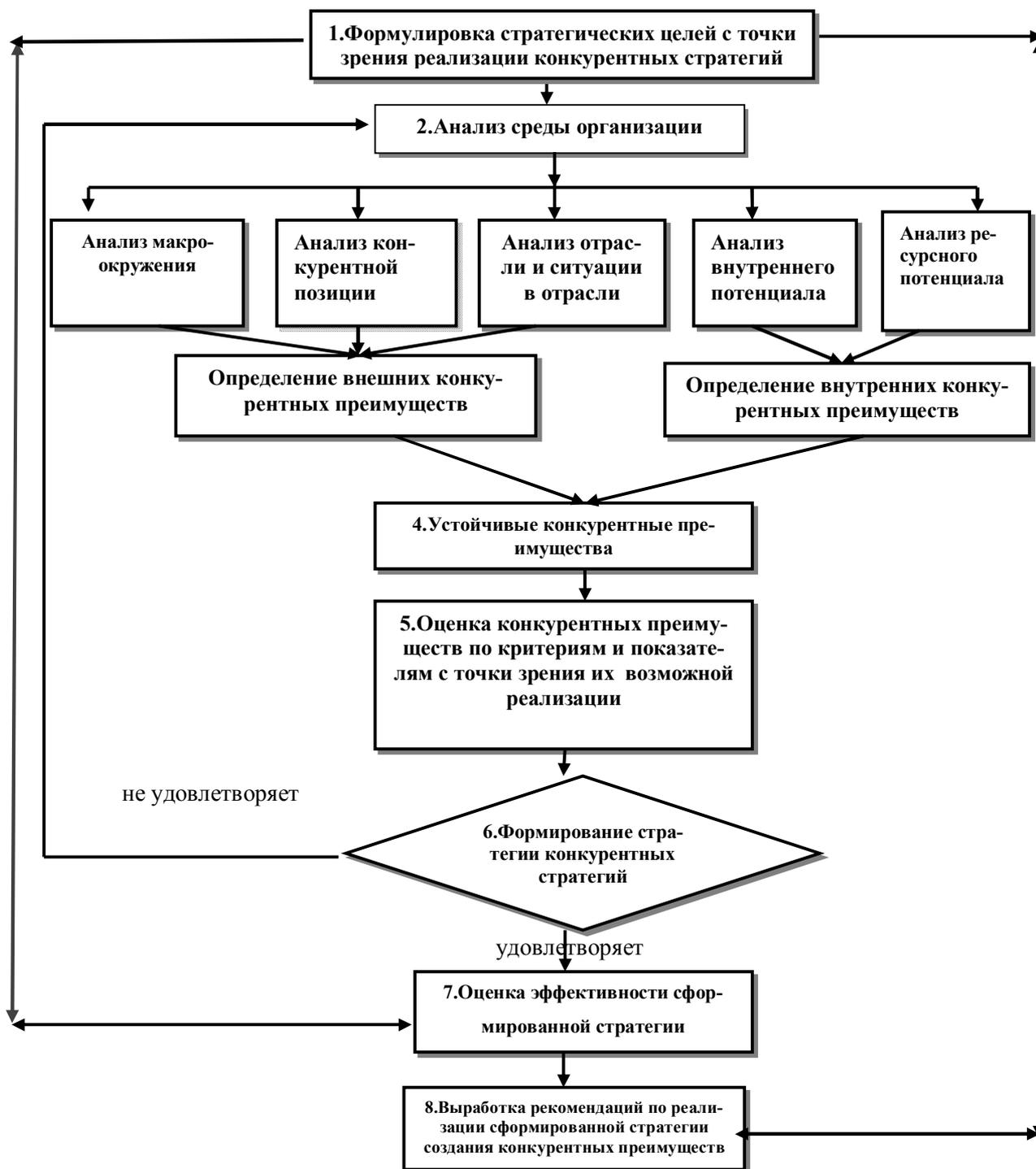


Рисунок 1 – Алгоритм формирования конкурентной стратегии

Таким образом, применение сценарного подхода в разработке конкурентных стратегий позволяет по-новому оценить масштаб происходящих событий, снизить степень неопределённости, определить тенденции развития в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвак, Б.Г. Разработка управленческого решения: учеб. пособие / Б.Г. Литвак. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 392 с.
2. Амosenок, Э.П. Машиностроение как доминанта в стратегиях развития отраслей экономики / Э.П. Амosenок, В.А. Бажанов // ЭКО. – 2005. – №1. – С. 75–90.
3. Лаева, Т.В. Сценарный анализ как основа стратегического планирования в организации / Т.В. Лаева // Менеджмент в России и за рубежом. – 2006. – №1. – С. 56–63.

4. Кормановская, И.Р. Прогнозный сценарий устойчивого развития новгородской области / И.Р. Кормановская, Е.В. Птицына // Иновации. – 2010. – №02(136). – С. 94–99.
5. Минина, Ю.И. Развитие машиностроения как основа роста производительности труда / Ю.И. Минина // Вестник Самарского экономического университета, серия «Экономика». – 2010. – №7(69). – С. 94–99.
6. Суслов, В.И. Сценарии экономического развития: инновационные аспекты / В.И. Суслов // ЭКО. – 2010. – №2(428). – С. 2–15.
7. Сорокин, Д. Экономические перспективы России / Д. Сорокин // Проблемы теории и практики управления. – 2009. – №3(428). – С. 8–18.
8. Попов, С. Сценарное планирование в системе стратегического менеджмента / С. Попов // Консультант директора. – 2001. – №23(155). – С. 16–22.
9. Райская, Н.Н. Российская экономика в 2009-2010годах: тенденции, анализ, прогноз / Н.Н. Райская, Л.С. Рощина // Вопросы статистики. – 2010. – № 1. – С. 45–47.
10. Трофимова, И.Н. Станет ли Россия конкурентноспособной, чем в конце 90-х? / И.Н. Трофимова // Вопросы статистики. – 2009. – №1. – С. 40–49.

Бондарева Светлана Руфимовна

ФГОУ ВПО «Государственный университет - УНПК», г. Орёл
Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова,
Заведующая кафедрой «Менеджмент»
Тел.(4862) 55-15-96
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

S.R. BONDAREVA

**SCENARIO APPROACH IN COMPETITIVE STRATEGY
AT MACHINE BUILDING COMPANY**

In this paper the author shows the main components of a scenario approach to the competitive strategy formation at a machine building company.

Key word: *scenario approach, scenario, competitive strategy, competitive advantages.*

BIBLIOGRAPHY

1. Litvak, B.G. Razrabotka upravlencheskogo reshenija: ucheb. posobie / B.G. Litvak. – М.: INFRA-M, 2001. – 392 s.
2. Amosenok, Je.P. Mashinostroenie kak dominanta v strategijah razvitija otraslej jekonomiki / Je.P. Amosenok, V.A. Bazhanov // JeKO. – 2005. – №1. – S. 75–90.
3. Laeva, T.V. Scenarnyj analiz kak osnova strategicheskogo planirovanija v organizacii / T.V. Laeva // Menedzhment v Rossii i za rubezhom. – 2006. – №1. – S. 56–63.
4. Kormanovskaja, I.R. Prognoznyj scenarij ustojchivogo razvitija novgorodskoj oblasti / I.R. Kormanovskaja, E.V. Pticyna // Innovacii. – 2010. – №02(136). – S. 94–99.
5. Minina, Ju.I. Razvitie mashinostroenija kak osnova rosta proizvoditel'nosti truda / Ju.I. Minina // Vestnik Samarskogo jekonomicheskogo universiteta, serija «Jekonomika». – 2010. – №7(69). – S. 94–99.
6. Suslov, V.I. Scenarii jekonomicheskogo razvitija: innovacionnye aspekty / V.I. Suslov // JeKO. – 2010. – №2(428). – S. 2–15.
7. Sorokin, D. Jekonomicheskie perspektivy Rossii / D. Sorokin // Problemy teorii i praktiki upravlenija. – 2009. – №3(428). – S. 8–18.
8. Popov, S. Scenarnoe planirovanie v sisteme strategicheskogo menedzhmenta / S. Popov // Konsul'-tant direktora. – 2001. – №23(155). – S. 16–22.
9. Rajsckaja, N.N. Rossijsckaja jekonomika v 2009-2010godah: tendencii, analiz, prognoz / N.N. Rajsckaja, L.S. Rowina // Voprosy statistiki. – 2010. – № 1. – S. 45–47.
10. Trofimova, I.N. Stanet li Rossija konkurentnosposobnoj, chem v konce 90-h? / I.N. Trofimova // Voprosy statistiki. – 2009. – № 1. – S. 40–49.

Bondareva Svetlana Rufimovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Technological institute named after N.N. Polykarpov
Head of department “Management”
Tel.: 4862-55-15-96
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

А.В. МОРОЗОВА, Н.Е. МОСЬКИНА

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ПРОФИЛЬНОГО ВУЗА

В статье анализируется опыт внедрения системы дополнительного профессионального образования для инженерно-технических специалистов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроительного производства.

Ключевые слова: *специалист машиностроительного производства, многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров, система дополнительного профессионального образования, профильный вуз, учебно-научно-производственный комплекс.*

Значительное число публикаций в научной литературе подчеркивает актуальность модернизации всей системы профессионального образования. Наиболее эффективной формой таких преобразований является система многоуровневого профессионального образования, реализуемая на базе интегрированных университетских комплексов, которые способны предложить не только выпускникам школ, но и не имеющим профессионального образования практикам новые, непрерывные, гибкие образовательные траектории в рамках всех уровней обучения с учетом индивидуальных способностей и потребностей в обучении.

Одним из вариантов реализации таких преобразований, изменяющих не только структуру, содержание, кадровое обеспечение системы профессионального образования, но и его институциональные цели, может стать системная трансформация, которая осуществляется в несколько этапов:

– на начальном этапе сохраняется ныне действующая структура системы профессионального образования, но неизбежным является переход на двухуровневую систему подготовки выпускников, обучающихся по программам ВПО;

– формирование системы профильных вузов на базе крупных университетских комплексов, которые будут осуществлять подготовку специалистов по программам НПО, СПО, ВПО, а также формировать систему послевузовского и дополнительного профессионального образования в рамках единой учебно-научно-производственной стратегии развития определенных отраслей экономики региона (машиностроение, энергообеспечение, транспорт, пищевая промышленность и т.д.);

– построение системы подготовки и переподготовки кадров в соответствии с едиными общеевропейскими требованиями к содержанию и уровню сформированности системы компетенций различных категорий специалистов, обеспечивающих кадровый и инновационный потенциал развития отраслей экономики [1].

В целом, задача построения эффективной системы подготовки кадров для регионального машиностроительного комплекса, выпускающей специалистов нового поколения, является системной с управленческой, мультидисциплинарной с педагогической, сложноструктурированной с социологической и суперпозиционной с экономической точек зрения. Реструктуризация громадных университетских сообществ в конгломерат профильных вузов позволяет решить эту сложную задачу социально-педагогическими средствами многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров. Перенос акцента по реализации тактического управления университетом на профильные вузы, которые, представляя сообщества специалистов и студентов, обладающих определенной сферой профессиональных интересов, при меньшей численности участников социального взаимодействия имеют более высокий уровень его плотности. Это позволяет в сложившейся в настоящее время социальной и экономической ситуации, концентрируя материальные и кадровые ресурсы, осуществлять подготовку инженерно-технических кадров, предоставляя возможность студентам получать в условиях вуза еще и дополнительное профессиональное образование [3].

Основным объектом проводимых по этой проблеме исследований являются студенты машиностроительного профиля, обучающиеся на Факультете технологии и конструкторско-технологической информатики и Факультете среднего профессионального образования Технологического института имени Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (рисунок 1). Методологическую основу исследования составляют методы структурного функционального и системного анализа, а также методы анкетного опроса и экспертно-статистические методы исследования результативности деятельности образовательного учреждения по реализации программ высшего профессионального образования и среднего профессионального образования специальности «Технология машиностроения».

Исследования показали, что значительная часть студентов и выпускников Факультета конструкторско-технологической информатики видит улучшение качества подготовки специалистов в приобретении в рамках образовательного процесса параллельно с высшим профессиональным образованием еще и дополнительной рабочей профессии по профилю своей специальности (станочник (токарь, фрезеровщик, сверловщик и т.д.) или оператор ЭВМ). Это позволит не только лучше познакомиться с работой технологического оборудования, но и повысить потенциал своей конкурентоспособности на рынке труда.

Особенностью реализации практикоориентированной системы подготовки кадров на Факультете среднего профессионального образования, традиционно осуществляющем подготовку специалистов для машиностроительного комплекса региона, является организация значительной части производственной практики на собственной производственной базе – учебно-производственных мастерских института.

Свою деятельность учебно-производственные мастерские Орловского машиностроительного техникума (ныне – Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК») начинали в 1946 году на базе завода «Текмаш». В 1971 г. было введено в эксплуатацию здание УПК, примыкающее к учебному корпусу, где мастерские находятся и поныне. На протяжении 50-90 гг. производство оснащается парком металлорежущего оборудования, позволяющего выполнять почти весь цикл механосборочных работ (в настоящее время эксплуатируются более 75 единиц оборудования). С 1971 г. в мастерских выпускались настольно-сверлильные станки 2А112. Оборудование производилось в рамках государственного плана по Министерству легкой и пищевой промышленности. К началу 80-х годов изготовлено более 12 тыс. шт. С 1983 г. освоено производство станков 2М112, общий объем выпуска которых составил около 5 тыс. единиц. Большое значение в организации производственного процесса имеет система стратегического сотрудничества с промышленными предприятиями региона, заказы которых в настоящее время выполняются на базе учебно-производственных мастерских (ОАО «Строймаш», ООО «Стеклопак», ОЗБИО, ОАО «Завод им. Медведева», ОАО «Текмаш» и др.).

Проведенный анализ ФГОС и системы заказов, реализуемых на базе учебно-производственных мастерских, показал целесообразность привлечения студентов II – IV курсов к их выполнению в период производственной практики, которая включает, в том числе, и практическое обучение работе на технологическом оборудовании, как этого требует образовательный стандарт данной специальности. Основная и наиболее репродуктивная часть практического обучения (учебная практика, включающая 3 недели слесарной

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени Н.Н. Поликарпова
 ФГОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»

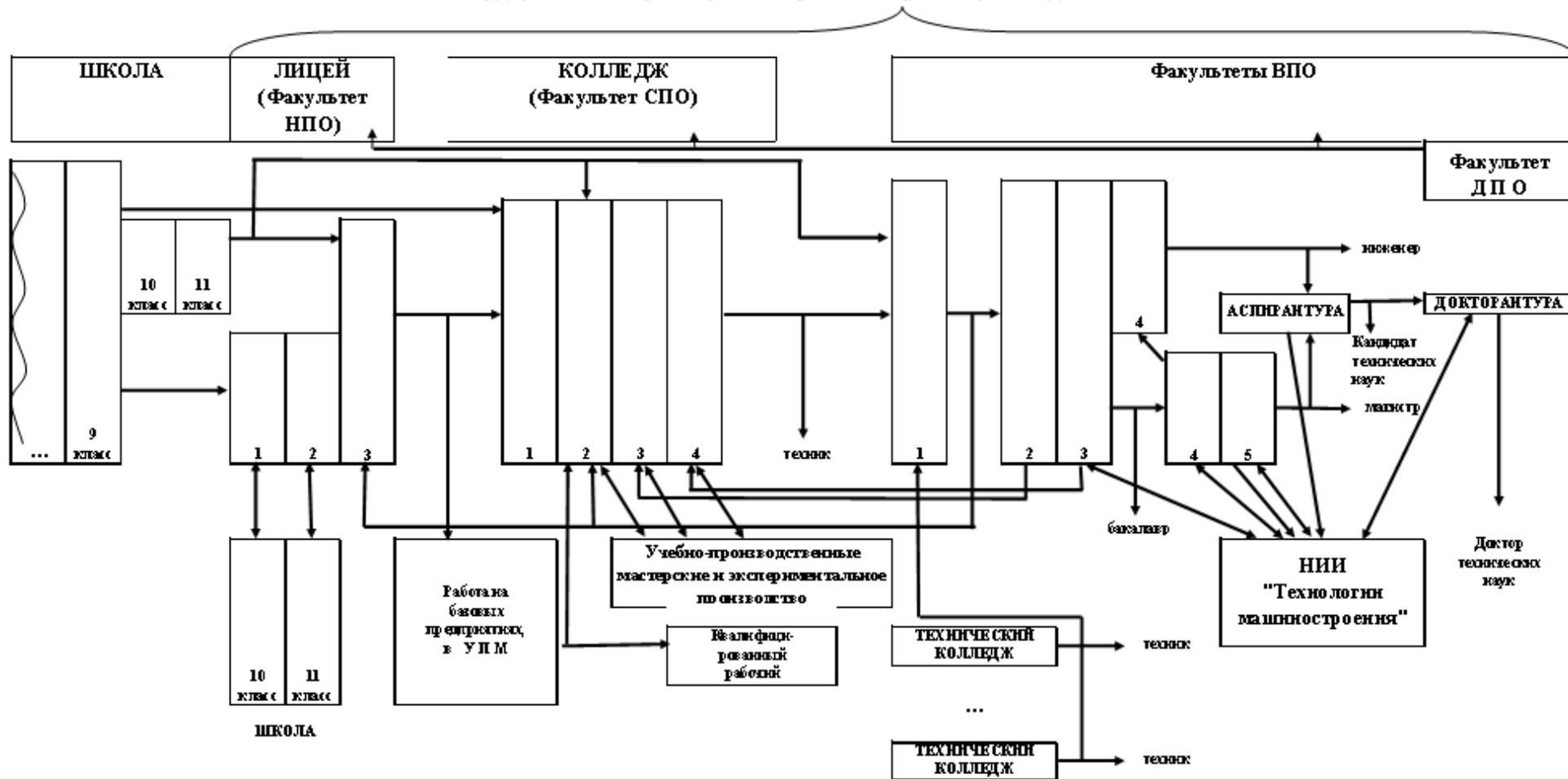


Рисунок 1 – Структура многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров на базе профильного вуза (Технологический институт имени Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Государственный университет- учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел)

практики, 5 недель механической практики и 6 недель практики на получение рабочей профессии) проходит на базе учебно-производственных мастерских института. Значительная часть студентов и технологическую практику также проходит в условиях выполнения производственных заказов на базе УПК. Оборудование мастерских включает необходимые металлорежущие станки основных групп – токарной, сверлильно-расточной, фрезерной и шлифовальной, а также станки горизонтально-протяжные, зубофрезерные, шпоночно-фрезерные, долбежные, строгальные. Руководство практикой осуществляют опытные мастера производственного обучения очень высокой квалификации, что подтверждают результаты участия, как самих мастеров, так и их воспитанников в ежегодно проводимых региональных конкурсах профессионального мастерства. Учебная практика заканчивается экзаменом на получение рабочей профессии, в результате которого студентам присваивается 2-й либо 3-й разряд по одной из рабочих профессий: токарь, фрезеровщик или слесарь механосборочных работ, о чем затем делается соответствующая запись в аттестационный лист диплома среднего профессионального образования. Для подготовки к теоретической части экзамена на получение рабочей профессии используется комплект программно-дидактических тестовых материалов, разработанных преподавателями и мастерами производственного обучения Факультета среднего профессионального образования и имеющий сертификат соответствия (сертификат соответствия № РОСС RU. СП22.Н00079; разрешение на применение знака соответствия № РОСС RU. СП22.Н00079/79, выданные Органом по сертификации программно-дидактических тестовых материалов и технологий компьютерного тестирования (ОС «ТЕСТ-Профобразование»). Подготовка к теоретической части экзамена осуществляется с применением системы тестового контроля знаний «Конструктор тестов» [2].

С 2009 года в рамках системы многоуровневого профессионального образования на факультете СПО реализуется программа начального профессионального образования по профессии «Станочник (металлообработка)». Стандарт данной профессии предусматривает две специализации – оператор станков с программным управлением и станочник широкого профиля. Несмотря на отсутствие в парке оборудования учебно-производственных мастерских станков с программным управлением, проблема подготовки специалистов решается в рамках заключенных долгосрочных договоров о прохождении практики с машиностроительными предприятиями города Орла, такими как ООО «Завод им. Медведова – Машиностроение», ОАО «ОрелТЕКМАШ», ЗАО «Стеклопак». Государственная (итоговая) аттестация включает защиту выпускной квалификационной работы (выпускная практическая квалификационная работа и письменная экзаменационная работа). В настоящее время вторая часть итоговой аттестации проводится в форме компьютерного тестирования с помощью электронной базы тестовых заданий. При реализации тестирования используется программный продукт «Конструктор тестов», база тестовых заданий сертифицирована (сертификат соответствия № РОСС RU. СП22.Н00089; разрешение на применение знака соответствия № РОСС RU. СП22.Н00089/89, выданные Органом по сертификации программно-дидактических тестовых материалов и технологий компьютерного тестирования (ОС «ТЕСТ-Профобразование»).

Опрос многочисленных выпускников, обучавшихся по специальности «Технология машиностроения» на Факультете среднего профессионального образования, показал, что многие из них начинали свою трудовую деятельность в качестве рабочих-станочников, что не мешало им повышать свою квалификацию, обучаясь еще и по программам высшего профессионального образования в рамках системы многоуровневого профессионального образования, реализуемой в настоящее время Технологическим институтом имени Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». Наличие рабочей профессии, во-первых, помогает им лучше усваивать теоретический материал, во-вторых, дает возможность работать по специальности, получать достойную заработную плату, что обеспечивает их социальную независимость от родителей, а часто позволяет и обеспечивать свои семьи. В связи с этим многие из студентов высказывают пожелание факультету о реализации программ дополнительного профессионального образования по рабочим профессиям с целью получения более вы-

сокого разряда по профессии еще в ходе обучения на факультете, а также расширения сферы их дальнейшей производственной деятельности.

Анализ учебных планов специальности «Технология машиностроения» и профессии «Станочник (металлообработка)» показал, что если реализовать программу дополнительного профессионального образования на старших курсах, основываясь на программе начального профессионального образования, то дополнительного теоретического обучения не потребуется, достаточно будет выделить время на прохождение дополнительного практического обучения и провести квалификационный экзамен. Этот же подход может быть реализован и при реализации программы высшего профессионального образования по специальности «Технология машиностроения»

Таким образом, общая структура системы дополнительного профессионального образования профильного вуза, осуществляющего подготовку молодежи по специальности «Технология машиностроения» в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров, имеет вид (рис. 2):

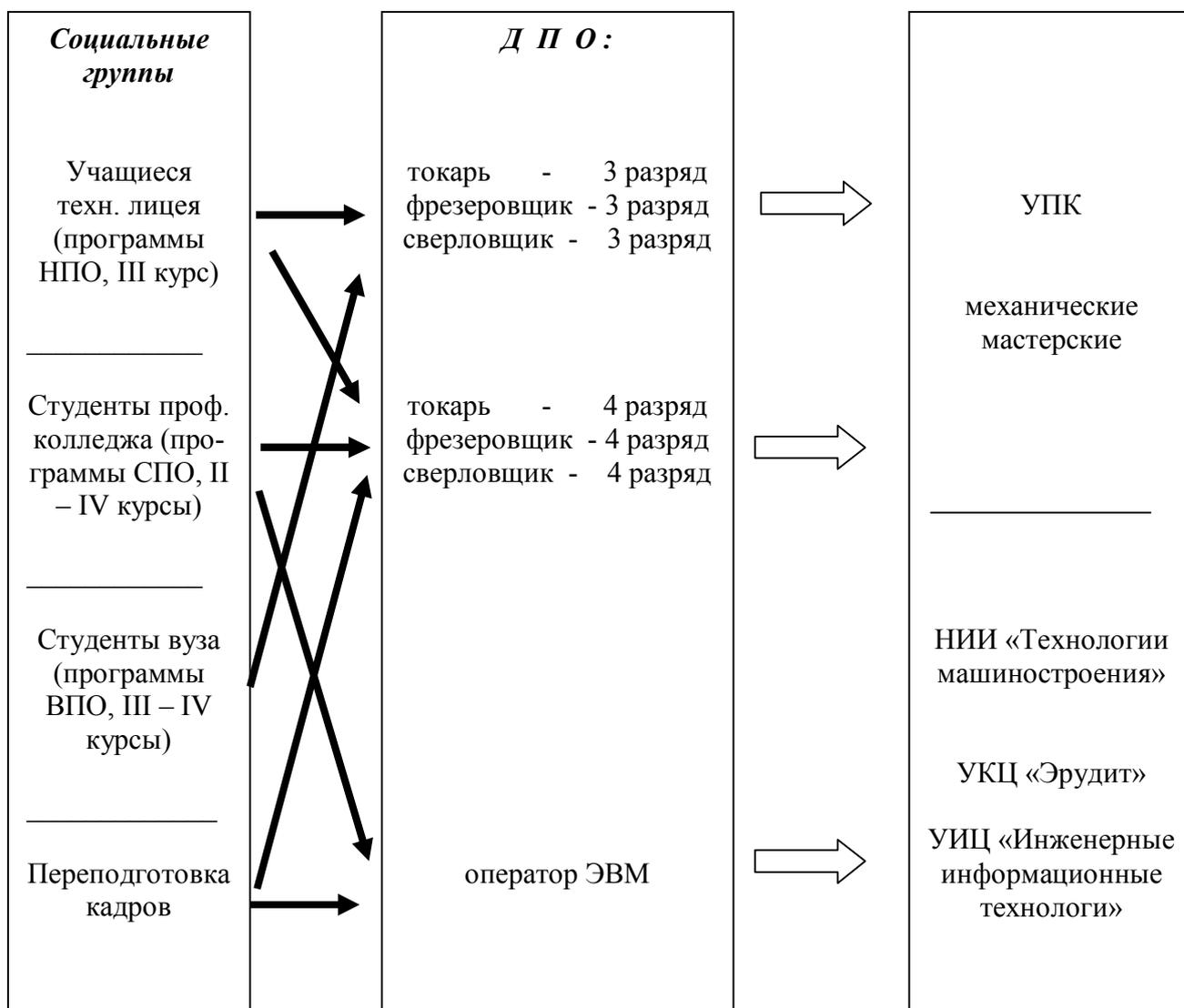


Рисунок 2 – Структура системы дополнительного профессионального образования профильного вуза (Технологический институт имени Н.Н. Поликарпова ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Формирование системы дополнительного профессионального образования в условиях профильного вуза университетского учебно-научно-производственного комплекса имеет следующую специфику:

– система дополнительного профессионального образования, имея многоуровневую структуру, ориентирована на различные социальные группы населения (студенты, обучающиеся по программам среднего профессионального образования, специалисты, нуждающиеся в профессиональной переподготовке, студенты, обучающиеся по программам высшего профессионального образования, безработные и т.д.);

– подготовка кадров по системе дополнительного профессионального образования осуществляется на базе технологического оборудования, которое используется при реализации основных образовательных профессиональных программ, поэтому получение дополнительной профессии лишь улучшает общий уровень освоения студентами этих образовательных программ;

– получение профессии по системе дополнительного профессионального образования позволяет многим выпускникам системы СПО профильного вуза, имеющим низкий уровень материальной обеспеченности семей, продолжить обучение по программам ВПО, совмещая учебный процесс по очно-заочной форме обучения с работой на технологическом оборудовании на промышленных предприятиях и фирмах; это позволяет им самостоятельно повышать свой социальный статус посредством получения хорошего материального дохода и более высокого образовательного уровня по профилю имеющейся специальности, а, в перспективе, приобретать опыт и уважение в рабочем коллективе, формируя базовый потенциал своего карьерного роста.

В этой связи, можно сделать вывод, что внедрение дополнительного профессионального образования по рабочей профессии «Станочник (металлообработка)» для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования и среднего профессионального образования по специальности «Технология машиностроения» профильного вуза университетского комплекса, не только возможно, но и целесообразно, востребовано как выпускниками, так и потенциальными работодателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киричек, А.В. Многоуровневая практикоориентированная система подготовки кадров для машиностроения: история, современность, перспективы. Коллективная монография. [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова, С.В. Андреев, А.А. Алисов и др.; Под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 368с.

2. Морозова, А.В. Применение квалиметрических методов в оценке специалиста технического профиля [Текст] / А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5(283). – С. 105–110.

3. Морозова, А.В. Управление профессиональной социализацией студентов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения. Монография. / А.В. Морозова; Под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 230 с.

Морозова Анна Валентиновна

ФГОУ ВПО «Государственный университет - УНПК», г Орел

Кандидат социологических наук

Заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

тел./ fax (4862)555524

E-mail: niotiostu@gmail.com

Москина Нина Евгеньевна

ФГОУ ВПО «Государственный университет - УНПК», г Орел

Преподаватель Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

тел./ fax (4862)555145

E-mail: fsपो-ti@rambler.ru

A.V. MOROZOVA, N.E. MOS'KINA

SPECIFICS OF THE FORMATION OF ADDITIONAL PROFESSIONAL EDUCATION FOR ENGINEERING PRODUCTION SPECIALISTS IN THE PROFILE HIGH SCHOOL

The article examines the experience of the introduction of additional vocational training for engineers and technicians in multilevel practice-oriented training system for engineering production specialists.

Keywords: *specialist in engineering industries, practice-oriented multilevel system of training, the system of additional vocational education, profile universit, academic-research-industrial complex.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kirichek, A.V. Mnogourovnevaja praktikoorientirovannaja sistema podgotovki kadrov dlja mashinostroenija: istorija, sovremennost', perspektivy. Kollektivnaja monografija. [Tekst] / A.V. Kirichek, A.V. Morozova, S.V. Andreev, A.A. Alisov i dr.; Pod red. A.V. Kiricheka i A.V. Morozovoj. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 368s.
2. Morozova, A.V. Primenenie kvalimetriceskikh metodov v ocenke specialista tehničeskogo profilja [Tekst] / A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 5(283). – S. 105–110.
3. Morozova, A.V. Upravlenie professional'noj socializaciej studentov v uslovijah mnogourovnevoj praktikoorientirovannoj sistemy podgotovki kadrov dlja mashinostroenija. Monografija. / A.V. Morozova; Pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 230 s.

Morozova Anna Valentinovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Candidate of sociological science
Technological institute named after N.N.Polykarpov
Head of department “Management”
Tel.: 4862-555524
E-mail: niotiostu@gmail.com

Moskina Nina Eugenievna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Teacher of technological institute named after N.N.Polykarpov
Tel./fax: 4862-555145
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3.08

В.Г. ЛИСИЧКИН

ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ ПРИБОР РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ С ПОНИЖЕННЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Для повышения достоверности контроля влажности в условиях повышенной активной проводимости контролируемого материала предлагается использовать двухпараметрический способ резонансных диэлькометрических измерений. Разработана и экспериментально исследована схема прибора, позволяющая реализовать этот способ и существенно уменьшить погрешность измерений, а также снизить потребляемую мощность.

Ключевые слова: резонансный контроль влажности, погрешность измерений, потребляемая мощность.

ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности и сельского хозяйства широкое применение находят приборы резонансного контроля влажности, состоящие из первичного емкостного преобразователя, автогенератора и измерительного устройства. Работа таких приборов основана на диэлькометрическом способе измерений и использовании явления резонанса в колебательных системах. Емкостный преобразователь включается в колебательную систему автогенератора. При изменении влажности в контролируемой зоне меняется диэлектрическая проницаемость и, следовательно, емкость преобразователя, что приводит к пропорциональным изменениям амплитуды, частоты или фазы выходных колебаний, которые измеряются с определенной точностью.

Помимо точности измерений, а также таких характеристик, как быстродействие и чувствительность, существенное значение имеют требования к экономическим показателям: массе, потребляемой мощности и цене. Кроме того, в ряде случаев возникает интерес к таким характеристикам приборов, как автономность работы и портативность. Большое значение для реализации таких требований имеет снижение энергопотребления в приборах резонансного контроля влажности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как правило, большинство контролируемых сред – это диэлектрики с активными потерями, поэтому их диэлектрическая проницаемость является величиной комплексной [1]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'',$$

где действительная часть ε' является функцией влажности.

Мнимая часть проницаемости определяется общими потерями: за счет активной проводимости σ и частоты ω (первое слагаемое) и релаксационной составляющей потерь ε''_{rel} [2]:

$$\varepsilon'' = \sigma / \omega\varepsilon_0 + \varepsilon''_{rel},$$

В этом случае емкость датчика с контролируемым материалом между обкладками конденсатора также будет комплексной:

$$C_x^* = C_x - j \left(\frac{g_c \sigma}{\omega} + g_c \varepsilon''_{rel} \varepsilon_0 \right), \quad (1)$$

где g_c – геометрический фактор датчика в конкретной среде.

Действительная часть выражения (1) соответствует истинной емкости датчика C_x , в которой скрыта информация о контролируемой влажности, а отклонение частоты прибора резонансного контроля будет пропорционально «кажущейся» емкости C_x^* .

Можно переписать выражение (1) в упрощенном виде:

$$j\omega C_x^* = j\omega C_x + G_x,$$

где эквивалентная проводимость потерь определяется выражением

$$G_x = g_c\sigma + g_c\omega\varepsilon_{rel}''\varepsilon_0 \approx g_c\sigma,$$

так как в рабочей области частот релаксационная составляющая заметной роли не играет и потери в контролируемом материале обусловлены, в основном, активной проводимостью σ .

Таким образом, измерение влажности в условиях влияния активных потерь в контролируемом материале будет осуществляться с погрешностью, возрастающей с увеличением потерь. Кроме того, с ростом активной проводимости вещества, которым заполняется емкостный датчик, увеличивается шунтирование колебательной системы автогенератора, падает добротность контура, уменьшается стабильность частоты автогенератора и растет потребляемая мощность прибора контроля.

Если оценивать значение контролируемого параметра по резонансной частоте измерительного преобразователя с емкостным датчиком в своем составе, при этом наступление резонанса определять по максимуму резонансной кривой, то возникает дополнительная погрешность измерений из-за влияния электропроводности контролируемого материала. Увеличение активной проводимости материала, находящегося в зоне действия емкостного датчика, приводит к ухудшению добротности колебательной системы, элементом которой является датчик. Формула для резонансной частоты $f_p = 1/2\pi\sqrt{LC}$ справедлива для идеальных колебательных систем, добротность которых бесконечно велика. В реальных условиях контроля это выражение принимает вид [3]:

$$f_p' = \sqrt{1 - 1/4Q_3^2} / 2\pi\sqrt{LC} = f_p\sqrt{1 - 1/4Q_3^2},$$

где Q_3 – эквивалентная добротность контура с учетом электропроводности контролируемого материала.

Следовательно, измеряемое значение частоты f_p' будет отличаться от резонансного f_p , в котором скрыты истинное значение емкости C_x датчика и, соответственно, значение контролируемой влажности. При этом в результаты измерений вносится дополнительная погрешность, которую можно записать в следующем виде:

$$\gamma = \Delta f_p / f_p = (f_p - f_p') / f_p = 1 - \sqrt{1 - 1/4Q_3^2}. \quad (2)$$

При оценке этой дополнительной погрешности необходимо учитывать, что изменения в процессе контроля емкости датчика C_x сопровождаются изменениями эквивалентной добротности, обусловленными ее зависимостью от характеристического сопротивления колебательной системы. Расчеты, выполненные в соответствии с выражением (2), показывают, что снижение Q_3 от 10 до 1 приводит к увеличению дополнительной погрешности от 0,1 % до 10 % при определении влажности. Такая погрешность может быть соизмерима с нормируемым значением контролируемого параметра, определяемым соответствующим стандартом.

Для компенсации данной погрешности и повышения точности измерений нужно исключить или уменьшать влияние активной проводимости контролируемых материалов на результаты измерения влажности, что может быть достигнуто применением методов многопараметрического контроля, позволяющих компенсировать погрешности измерений различного вида из-за влияния мешающих факторов.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

В данной работе выполнена разработка принципиальной схемы и экспериментальные исследования аналоговой части прибора резонансного контроля влажности, который может быть использован для измерения влажности сыпучих материалов диэлькометрическим способом. При разработке этого прибора с автономным питанием, кроме требований к точности и линейности характеристики преобразования, учитывались дополнительные требования, применяемые к переносной аппаратуре:

- для уменьшения количества необходимых гальванических элементов прибор должен работать при низком напряжении питания $U_{\text{пит}} \approx (3 \dots 4,5)$ В;
- для увеличения времени непрерывной работы прибора без замены гальванических элементов его ток потребления должен быть минимально возможным;
- результаты цифровых измерений частоты и амплитуды выходного сигнала емкостного датчика должны запоминаться в блоке памяти и выводиться на индикаторное табло непосредственно в процентах влажности;
- наличие интерфейса и порта *USB* для связи с внешней ПЭВМ, обеспечивающих возможность перепрограммирования постоянного запоминающего устройства, в частности, для табличного задания характеристик преобразования в зависимости от вида или структуры контролируемого материала;
- возможность калибровки для периодической проверки правильности функционирования прибора;
- автоматический контроль напряжения автономного питания с визуальной индикацией разряда гальванических элементов;
- минимальные масса и габаритные размеры прибора.

Стабильность показаний и точность измерений влажности существенно зависят как от характеристик емкостного датчика, так и от качества аналоговой части прибора. При разработке влагомера основное внимание уделено улучшению параметров и исследованию характеристик резонансного блока, при этом конструкция емкостного датчика может выбираться из числа существующих с учетом особенностей контролируемого материала.

В результате предварительных экспериментальных исследований, проведенных после натуральных испытаний различных схем *LC*-генераторов, собранных на операционных усилителях, КМОП логических элементах и транзисторах, разработана схема прибора резонансного контроля влажности. Эта схема состоит из автогенератора на полевом транзисторе с индуктивной трехточкой и емкостного датчика в составе колебательной системы (рисунок 1, *a*). При сравнительной простоте реализации в этом приборе обеспечивается выполнение сразу нескольких требований, предъявляемых к автономным устройствам контроля:

1. Амплитуда выходного сигнала ограничивается на максимальном уровне $U_m \leq 2$ В за счет включения кремниевого диода *VD* в цепи затвора полевого транзистора, что позволяет автоматически согласовать уровни выходного сигнала датчика с цифровой частью прибора.
2. В цепи истока полевого транзистора схемы прибора установлен дополнительный резистор R_2 , зашунтированный фильтрующим конденсатором $C_{\text{ф}}$. Это позволяет, во-первых, ограничить постоянный ток потребления генератора на микроамперном уровне; во-вторых, повысить температурную стабильность частоты выходных колебаний генератора при изменении напряжения питания и температуры эксплуатации датчика; в третьих, сформировать без применения дополнительного амплитудного детектора регулирующее напряжение U_p , величина которого прямо пропорциональна проводимости G_x контролируемого материала.

В данной схеме (рис. 1, *a*) можно сразу получать два параметра, характеризующих влажность и электрическую проводимость контролируемого материала. При этом можно по частоте колебаний генератора f_p судить о диэлектрической проницаемости ϵ , а по напряже-

нию U_p – о проводимости материала и использовать этот второй параметр для коррекции результатов контроля влажности.

Особенностью разработанной схемы, которая может служить аналоговой частью цифрового влагомера, является нелинейный режим работы полевого транзистора VT (рис. 1, а), который работает в глубоком C -режиме. В каждом периоде колебаний транзистор открывается только на короткое время, а формирование гармонической формы выходного сигнала обеспечивается за счет избирательных свойств LC -контура. Вследствие этого обеспечивается высокая добротность контура и, как следствие, высокая стабильность частоты выходных колебаний (при постоянных значениях LC -параметров).

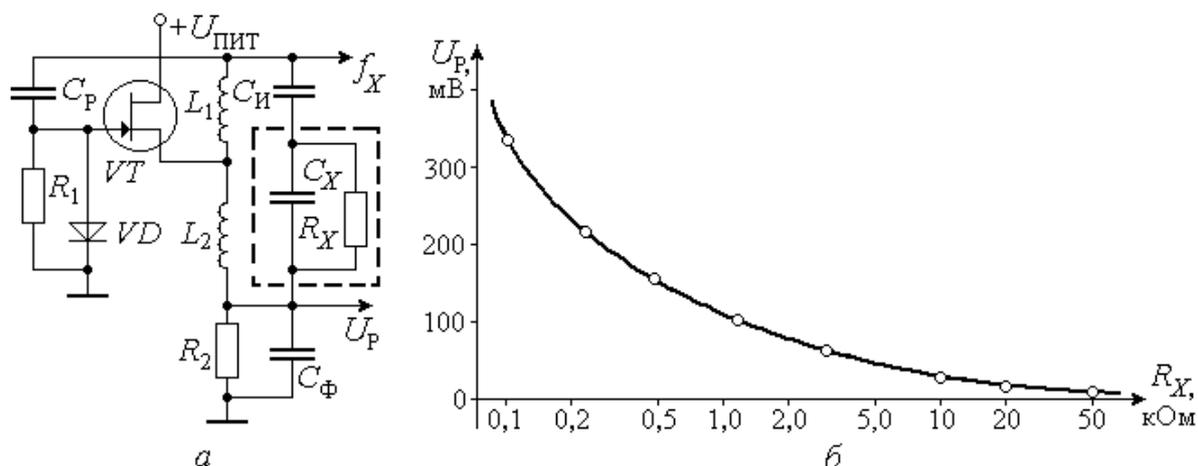


Рисунок 1 – Принципиальная схема (а) и зависимость напряжения U_p генераторного датчика влажности от сопротивления материала (б)

В схеме генератора обеспечивается практически линейная зависимость постоянного тока питания полевого транзистора от проводимости контролируемого материала $I_{пит} = K_i G_x$ и соответственно нелинейная зависимость падения напряжения U_p на образцовом резисторе R_2 от сопротивления R_x материала. Согласно экспериментальной зависимости напряжения $U_p = I_{пит} R_2$ от сопротивления R_x (рис. 1, б), понижение активного сопротивления R_x контролируемого материала, что эквивалентно увеличению проводимости G_x , однозначно приводит к увеличению напряжения U_p от единиц до сотен милливольт. Это напряжение кодируется с помощью АЦП, входящего в состав микропроцессорной цифровой части влагомера, и используется для последующей коррекции результатов измерения влажности контролируемого материала в зависимости от его электрической проводимости.

Радикальным способом, позволяющим уменьшить влияние активной проводимости материала на результаты измерений его влажности, является нанесение диэлектрического покрытия на электроды емкостного датчика. Такой технологический прием позволяет снизить относительную чувствительность емкостного датчика к активной проводимости влажного материала, так как изоляция электродов датчика эквивалентно включению дополнительного конденсатора $C_{и}$ последовательно с емкостью C_x , а это приводит к снижению резонансной чувствительности относительно максимального значения, составляющего

$$S_{pmax} = (\Delta f_p / f_p) / (\Delta C_x / C_x) \approx 0,5.$$

Такая чувствительность достигается в резонансном LC -контуре, содержащем только одну емкость датчика C_x . При включении конденсатора $C_{и}$ последовательно с емкостью C_x резонансная чувствительность датчика определяется выражением

$$S_p \approx C_{и}(\Delta f_p / f_p) / (\Delta C_x / C_x)(C_{и} + C_x),$$

согласно которому подключение конденсатора $C_{и} = C_x$ приводит примерно к двукратному уменьшению чувствительности емкостного датчика и соответствующему уменьшению девиации его резонансной частоты.

Графические зависимости чувствительности S_p резонансного датчика и приращения частоты Δf_p от относительного изменения его емкости ΔC_x при наличии и без подключения конденсатора $C_{и}$ приведены на рисунке 2, а.

При экспериментальных исследованиях характеристик и чувствительности емкостного генераторного датчика к его электродам подключались конденсаторы и резисторы с известными номиналами, а также параллельные резистивно-емкостные цепи, параметры которых предварительно измерялись высокоточным цифровым прибором *INSTEK LCR-816*. Выходные параметры датчика контролировались по показаниям цифрового частотомера и цифрового мультиметра, причем показания приборов снимались не менее 10 раз в каждой точке. После этого вычислялись средние значения и дисперсия полученных результатов (резонансной частоты f_p и напряжения U_p), по которым были построены зависимости, приведенные на рисунках 1, б и 2.

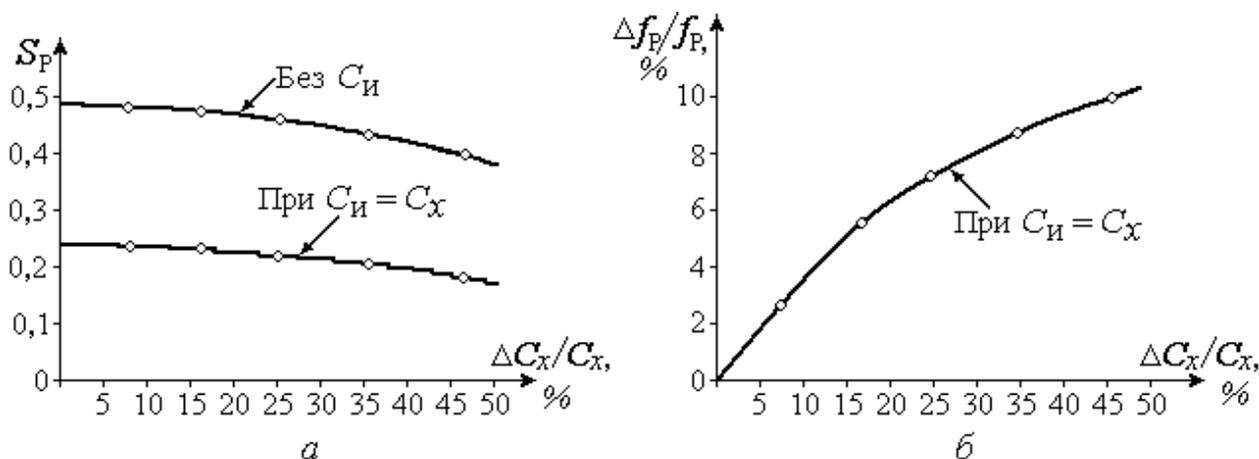


Рисунок 2 – Зависимости чувствительности (а) и относительного изменения частоты колебаний от приращения емкости датчика (б)

При экспериментальных исследованиях параметры измерительного LC-контура, содержащего датчик с начальной емкостью $C_{нач} = 3,25$ нФ, устанавливались таким образом, чтобы обеспечить резонансную частоту колебаний $f_{p0} \approx 100$ кГц (точное значение частоты составляло $f_{p0} \approx 99,6$ кГц). Затем к электродам датчика подключались разные конденсаторы с предварительно измеренными емкостями, составляющими 224, 546, 812, 1180 и 1504 пикофарад. После этого измерялись приращения частоты Δf_p и выполнялся расчет относительных значений чувствительности и частоты.

Согласно полученным данным, при относительном изменении емкости датчика $\Delta C_x / C_x$ от 10 до 50% его чувствительность уменьшается от 0,48 до 0,44% изменения частоты $\Delta f_p / f_p$ на каждый процент приращения емкости (при отсутствии конденсатора $C_{и}$). Подключение конденсатора $C_{и}$ приводит к уменьшению (рисунок 2, а) чувствительности датчика, и при изменении емкости C_x от 10 до 50% его чувствительность варьируется в пределах (0,23–0,19)% от изменения частоты $\Delta f_p / f_p$ на каждый процент приращения емкости.

Вследствие этого градуировочная кривая влагомера $\Delta f_p / f_p = F(\Delta C_x / C_x)$ является нелинейной (рис. 2, б), поэтому для получения результатов контроля в процентах относительной влажности необходимо выполнять линеаризацию характеристики преобразования прибора в цифровой форме.

При оценке взаимосвязи напряжения U_p с активным сопротивлением R_x контролируемого материала к электродам датчика подключались высокоточные резисторы типа С2-29В (при величине емкости $C_x = \text{const}$), и по полученным результатам построена вторая градуировочная характеристика (рис. 1, б).

Практически использование двух характеристик позволяет вычислить влажность материала по результатам измерений частоты f_x и напряжения U_p .

Из известной формулы [3], применяемой для вычисления частоты выходных колебаний f_x по частоте резонанса контура $f_p = 1/2\pi\sqrt{L_k C_{\Pi}}$ с индуктивностью L_k и полной емкостью C_{Π} пустого датчика, с учетом его добротности $Q = R_x / \sqrt{(L_1 + L_2) / C_{\Pi}}$, можно получить следующие выражения:

$$\omega_x = \omega_p \sqrt{1 - (1/2Q)^2} = \omega_p \sqrt{1 - (L_1 + L_2) / 4R_x^2 C_{\Pi}}. \quad (3)$$

Напряжение U_p обратно пропорционально активному сопротивлению материала и с учетом известного напряжения отсечки $U_{\text{отс}}$ полевого транзистора хорошо аппроксимируется выражением $U_p = U_{\text{отс}} R_0 / (R_0 + R_x)$. Тогда сопротивление контролируемого материала можно представить в виде $R_x = R_0 (U_{\text{отс}} - U_p) / U_p$.

Подстановка этого выражения в формулу (3) позволяет получить выражение для расчета измеряемой частоты:

$$f_x = f_p \sqrt{1 - \frac{(L_1 + L_2) \cdot U_p^2}{4R_0^2 (U_{\text{отс}} - U_p)^2 \cdot C_{\Pi}}},$$

из которого можно получить аппроксимирующую функцию двухпараметрового влагомера для вычисления частоты резонанса в следующем виде:

$$f_p = f_x / \sqrt{1 - \frac{(L_1 + L_2) \cdot U_p^2}{4R_0^2 C_{\Pi} (U_{\text{отс}} - U_p)^2}}.$$

Запись этой функции в ППЗУ позволяет по значениям напряжений U_p , $U_{\text{отс}}$ и полной емкости датчика C_{Π} вычислять с помощью микропроцессора влажность контролируемого материала с повышенной точностью.

ВЫВОДЫ

Применение двухпараметрического метода резонансного контроля влажности позволяет существенно ослабить влияние активной проводимости контролируемого материала на результаты измерений за счет оценки влажности по двум параметрам – резонансной частоте и амплитуде колебаний, тем самым значительно увеличивая точность прибора.

Выбор полевого транзистора для схемы автогенератора, работающего к тому же в глубоком С-режиме, позволяет, помимо обеспечения высокой добротности контура и, как следствие, высокой стабильности частоты выходных колебаний, обеспечить минимальное энергопотребление, что важно для автономных приборов контроля влажности. Включение в LC-контур последовательно с емкостным датчиком C_x дополнительного конденсатора C_{Π} позволяет уменьшить влияние потерь в контролируемом материале на добротность колебательной системы. Это приводит к дополнительному уменьшению потребляемой мощности,

невозможности срыва колебаний генератора при любых значениях проводимости G_x и тем самым обеспечить универсальность применения прибора для контроля влажности различных сыпучих материалов.

Поскольку включение дополнительного конденсатора C_{II} приводит к уменьшению чувствительности прибора контроля, можно такое схемное решение рассматривать как реализацию обменного пути снижения энергопотребления: повышение экономичности в обмен на запас по чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арш, Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений / Э.С. Арш. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.
2. Kelleners T. J. e. a. // Soil Science Society of America Journal. – 2004. – V. 68. – P. 430.
3. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Советское радио, 1971. – 672 с.

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры

г. Орел, ул. Панчука, 66

Тел. (4862) 47-00-96

E-mail: lisichkin@rekom.ru

V.G. LISICHKIN

TWO-PARAMETRICAL DEVICE OF WATER CONTENT RESONANT CONTROL WITH THE REDUCED POWER CONSUMPTION

For increase of the water content control reliability in the conditions of the raised a controllable material active conductivity is offered to use two-parametrical way of resonant dielectric measurements. The devices circuit is developed and experimentally investigated, allowing to realize this principle and essentially to reduce an error of measurements, and also to lower power consumption.

Key words: water content resonant control, metering error, power consumption.

BIBLIOGRAPHY

1. Arsh, Je.S. Avtogenetornye metody i sredstva izmerenij / Je.S. Arsh. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 256 s.
2. Kelleners T. J. e. a. // Soil Science Society of America Journal. – 2004. – V. 68. – P. 430.
3. Gonorovskij, I. S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly / I.S. Gonorovskij. – М.: Sovetskoe radio, 1971. – 672 s.

Lisichkin Vladimir Georgievich

Academy FSO of Russia, Orel

Candidate of technical science, associate professor, associate professor of department

ul. Panchuka, 66, Orel

Tel. 4862-47-00-96

E-mail: lisichkin@rekom.ru

А.С. ЗУБАРЕВ, П.Н. ШКАТОВ

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ УЗ КОНТРОЛЯ ГАЗОВЫХ И ВОДЯНЫХ ТРУБ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ МЕЖЭТАЖНЫЕ ПЕРЕКРЫТИЯ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ И ИМЕЮЩИХ БОЛЬШОЙ СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведены исследования по выбору оптимальной схемы ультразвукового контроля газовых и водяных труб проходящих через межэтажные перекрытия в жилых зданиях и имеющие большой срок эксплуатации. Было установлено, что характерным дефектом труб находящихся в межэтажных перекрытиях являются коррозионные повреждения и как следствие, сильное утонение стенки и разработана оптимальная схема контроля данных труб волнами Лэмба. Также рассмотрен вопрос о целесообразности применения твердотельной модели дифракции для ультразвукового контроля тонкостенных труб в межэтажных перекрытиях с применения волн Лэмба.

Ключевые слова: коррозионные повреждения, эхосигнал, волны Лэмба, утонения стенки, дефект, ультразвуковой контроль, труба, амплитуда эхо-сигнала, пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП).

АНАЛИЗ ДЕФЕКТНОСТИ ВОДО-ГАЗОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

По данным Главной инспекции государственного архитектурного надзора Госстроя России за период с 2002 года по 2008 год был зафиксирован рост крупных аварий в жилищно-коммунальном комплексе, связанных с разрушениями трубопроводов, из которых 20% от числа всех аварий связано с человеческим фактором: нарушение правил эксплуатации водогазопроводных трубопроводов. Как правило, примерно в 90 % случаев, причиной разрушения трубопроводов является коррозионное поражение участков трубопроводов. Такая ситуация является следствием нарушения или отсутствия антикоррозионного покрытия трубопроводов, а также отсутствия электрохимической защиты. Во многих случаях, места коррозионного поражения с критической толщиной стенки и менее находятся на участках, проходящих через межэтажные перекрытия и стенные перегородки, так как эти участки труб являются недоступными для визуального контроля и профилактических работ (рисунок 1).

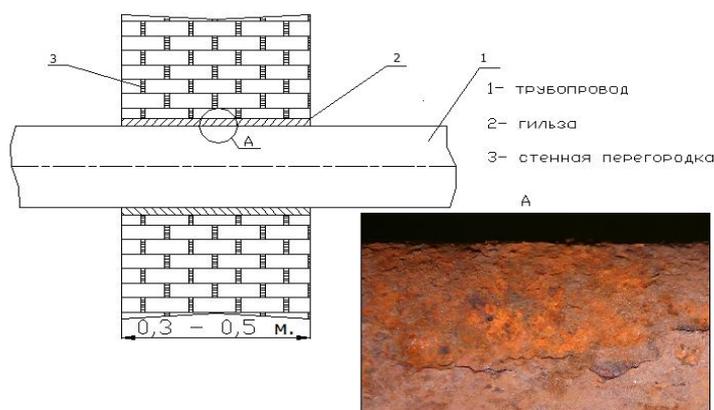


Рисунок 1 – Коррозионное поражение участка трубопровода

На рисунке 2 показан самый распространенный дефект монтажа – непровар корня шва, а на рисунке 3 – типовые образцы труб бывших в эксплуатации в жилых зданиях более 30-ти лет. Из рисунка видно, что основным дефектом труб проходящих через межэтажные перекрытия являются коррозионные повреждения т.к. очень часто в жилых домах старше 30-

ти лет труба в межэтажном перекрытии находится без футляра, а значит наружная поверхность напрямую взаимодействует с бетоном, что увеличивает скорость коррозии.

Анализ особенностей сборки трубопроводов (применение газовой сварки, ручной дуговой сварки) и послесборочного контроля (выборочный контроль сварных швов) показал, что существует вероятность существования в непроконтролированных сварных соединениях дефектов, приводящих к снижению прочности трубопроводов (трещины, поры), что представлено на рисунке 4. (представлено распределение количества дефектов в процентах от общего числа, наиболее часто встречающихся в подобных трубопроводах). Как было выяснено, 75 % от общего числа дефектов составляет коррозионное поражение участков, 10 % – трещины, 15 % – дефекты монтажа.



Рисунок 2 – Непровар корня шва



Рисунок 3 – Типовые образцы труб межэтажных перекрытий, бывшие в эксплуатации более 30 лет

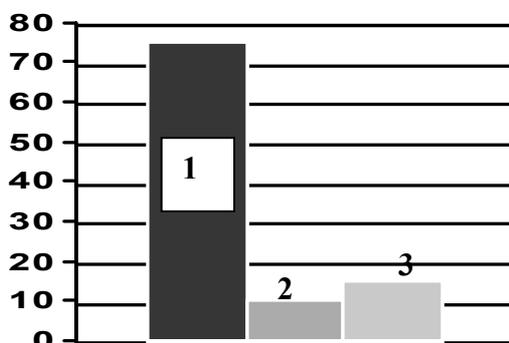


Рисунок 4 – Основные дефекты трубопровода:
1- коррозия, 2- трещины, 3- дефекты монтажа

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

При проведении работ, связанных с оценкой технического состояния трубопроводов, в том числе применяются ультразвуковые методы контроля.

Существуют различные схемы контроля и способы оценки первичной информации.

В зависимости от вида обрабатываемой первичной информации методы ультразвуковой дефектometрии подразделяются на две основные группы: амплитудные и временные.

В амплитудных способах оценка величины дефекта производится по амплитуде отраженного от него (в случае эхо-метода) или прошедшего (теневой, зеркально-теневой) через него сигнала. Амплитудные способы не позволяют в полной степени учесть конфигурацию дефекта и поэтому дают усредненную информацию, выражаемую через так называемые условные размеры.

Временные способы позволяют судить об истинных размерах дефекта, определив временную задержку, связанную с рассеянием волн на краях (верхнем и нижнем) дефекта.

В большинстве действующих в РФ отраслевых РД для оценки качества используются критерии, изложенные в ГОСТ 14782-86: амплитуда эхо-сигнала или эквивалентный размер, условная протяженность, условная высота, удельная плотность дефектов на единицу длины контролируемого участка. Так как применяется амплитудный метод оценки дефекта, то есть за счет отраженного или прошедшего сигнала, то результаты контроля будут зависеть от геометрии и расположения дефекта в сварном соединении и околошовной зоне, что является одним из недостатков методов ультразвукового контроля. Также необходим доступ к зоне контроля, что является невозможным для участков трубопроводов, проходящих через межэтажные перекрытия и стенные перегородки.

Также, для оценки состояния трубопровода применяется акустико-эмиссионный метод контроля. Акустико-эмиссионный метод контроля тоже имеет ряд недостатков:

- при применении акустико-эмиссионного метода необходимо изменять рабочий режим трубопровода (поднимать и понижать давление в трубопроводе), что может привести к его разрушению при диагностировании и, следовательно, к разрушению элементов здания; например, при наличии утечки из трубопровода при поднятии давления в нем возможно частичное разрушение элементов здания или его порча;

- акустико-эмиссионный метод не позволяет оценить тип дефекта, его величину, что заставляет дополнительно проводить исследование мест, в которых обнаружены возможные дефекты, другими методами неразрушающего контроля, что сопровождается освобождением элементов трубопровода в необходимых пределах от элементов здания (разрушение части стен и перекрытий).

В настоящее время существуют методики контроля, позволяющие определять сложно ориентированные дефекты, основанные на анализе характеристик волн Лэмба.

Исследованием возможностей этих волн посвящены работы как российских, так и иностранных специалистов.

В работах Н.П. Алешина, В.Г. Щербинского, И. А. Викторова, Л.М. Бреховских, В.В. Гончарова рассмотрены физические основы применения ультразвуковых волн Лэмба в технике. В частности, в трудах И.А. Викторова детально рассмотрены вопросы применения в технике волн Лэмба. Из исследований этого автора следует, что волны Лэмба могут быть использованы для контроля листового материала и конструкций различной толщины. При использовании в практике ультразвуковой дефектоскопии частот 0.5 – 10 МГц примерный диапазон толщин контролируемых металлических листов 0.3 – 25 мм. Для контроля листов толщиной менее 1.5 мм применяются, как правило, моды нулевого порядка, а для контроля более толстых листов – моды порядков 1 и 2.

Обнаружение дефектов в листах волнами Лэмба производится при помощи обоих методов ультразвуковой дефектоскопии – эхо-метода и теневого. Нормальными волнами можно выявлять самые разнообразные дефекты листового материала: трещины, пустотные полости, инородные включения, дефекты сварного шва, расслоения. Для контроля поверхности и поверхностного слоя необходимо применять моды нулевого порядка, так как у мод нулевого порядка движение локализовано у поверхности листа, а для контроля толщины – моды высших номеров.

Также в работах И.А. Викторова и других авторов, рассмотрен вопрос о контроле не только листового материала, но и труб. Было доказано, что волны Лэмба могут распространяться в цилиндрическом слое любого радиуса кривизны. При этом их затухание с расстоянием такое же, как и в плоском слое. Вот поэтому волнами Лэмба можно контролировать не только листы и листовые конструкции, но и трубы, причем все основные особенности и методики контроля листов переносятся и на контроль труб.

Важным практическим применением нормальных волн в технике является использование их в прецизионных измерениях толщины листовых конструкций, доступных для измерения только с одной стороны. Также, по фазовой скорости волн Лэмба, распространяющихся в образце с известной толщиной и плотностью, можно рассчитать упругие константы материала – модули Юнга и сдвига. Такой метод нахождения упругих констант очень полезен

в тех случаях, когда геометрия образца затрудняет использовать для этих целей продольные и поперечные волны.

В области практического применения волн Лэмба особый интерес представляют уникальные исследования В.Т. Боброва, С. К. Павроса, В. М. Веревкина, Н.Н. Егорова, Л.А. Никифорова. В частности, В.Т. Бобровым исследовано взаимодействие акустических волн с неоднородностями в твердом слое и полупространстве, решена двумерная задача о дифракции волн Лэмба на дефекте пластины типа прямоугольной риски, выполнен анализ результатов численных расчетов коэффициентов отражения и прохождения мод нулевого порядка волн Лэмба для различных значений параметров глубины и ширины риски и показано, что при изменении ширины риски наблюдается немонотонный характер зависимости указанных коэффициентов от ее глубины, а в случае вырождения риски в трещину зависимости становятся монотонными. Приближенно решена трехмерная задача о рассеянии фокусированных пучков волн Лэмба и сдвиговых нормальных волн на дефекте типа круглого отверстия, установлено, что при падении на дефект мод нулевого порядка имеет место сильное рассеяние, показано, что оно носит резонансный характер от размера дефекта. Изучение угловых диаграмм направленности подтверждает возможность использования для обнаружения сквозных дефектов не только рассеянных, но и трансформированных нормальных волн. Установлено, что коэффициенты отражения и трансформации мод нулевого порядка являются немонотонными функциями радиуса отверстия, за исключением относительно малых отверстий, а также, что волны Лэмба отражаются от малых отверстий значительно лучше, чем сдвиговые нормальные волны. Экспериментально получено качественное подтверждение данных расчетов. На основе экспериментальных и теоретических исследований разработаны методики и средства контроля тонкостенных сварных соединений.

В работе А.И. Потапова и В.Е. Полякова представлен способ контроля состояния поверхности и герметичности трубопровода волнами Лэмба. В результате проведенного ими анализа был сделан вывод, что наиболее эффективными по своим функциональным характеристикам являются моды нулевого порядка, а косвенными параметрами, несущими информацию о коррозионной стойкости трубопровода является фазовая скорость распространения волн Лэмба и изменение толщины трубы. Для возбуждения поверхностных волн используют (в контактном варианте, когда пьезопреобразователь расположен на поверхности изделия) метод клина. В этом случае пьезопреобразователь расположен под углом. При иммерсионном варианте - метод наклонно падающей волны. При перпендикулярном расположении преобразователя к поверхности объекта контроля используют метод "гребенки". В рассматриваемом случае наружная поверхность трубы "нагружена" на антикоррозионную защиту, а внутренняя - на энергоноситель - жидкость. При отсутствии энергоносителя, когда исследуется стальная труба с антикоррозионной защитой, граничные условия будут нулевыми по смещению. При использовании симметричной нулевой моды можно оценить изменение толщины стенки трубы вследствие коррозии. Также, И.А. Потаповым проведены теоретические исследования распространения волн Лэмба в многослойных изделиях.

В трудах С. К. Павроса, В. М. Веревкина, Н.Н. Егорова, Л.А. Никифорова исследованы возможности нормальных волн, разработана теория возбуждения, распространения и дифракции нормальных и поверхностных волн на различных неоднородностях в тонких листах. Результаты исследования реализованы в аппаратуре для контроля труб.

Исследования Б.-К. Жэн, Л.Лу посвящены решению задач распространения нормальных волн в упругом слоистом полупространстве.

Анализ вышеуказанных работ показал, что волна Лэмба обеспечивает достаточную чувствительность при длине листа в направлении прозвучивания 0.3 – 0.5 метров. Нормальные волны успешно применяются для контроля листов, труб, оболочек, имеющих небольшую толщину (0.3...25 мм и менее). Этими волнами обнаруживаются поверхностные трещины не только с наружной, но и с внутренней стороны, а также дефекты, ориентированные вдоль поверхности, которые трудно обнаружить объемными волнами. Для обеспечения большей вероятности обнаружения дефектов контроль ведут двумя модами нормальных

волн, используя теневую схему контроля, анализируя временные параметры процесса распространения нормальных волн. Анализ существующих технологий показал, что на данный момент остается нерешенным вопрос об обнаружении и идентификации внутренних дефектов, таких как трещины и несплошности объемного типа (поры), которые нередко встречаются в сварных соединениях, находящихся на участках трубопроводов, проходящих в «закладных» гильзах.

Учитывая вышеизложенное, целесообразно предложить следующую схему контроля недоступных участков трубопроводов (рисунок 5).

Для решения поставленной задачи необходимо создать твердотельную модель дифракции, позволяющую учитывать дифракционные волны, образующиеся на дефекте при падении на него упругой волны и на основе этой модели разработать критерий, однозначно определяющий тип дефекта.

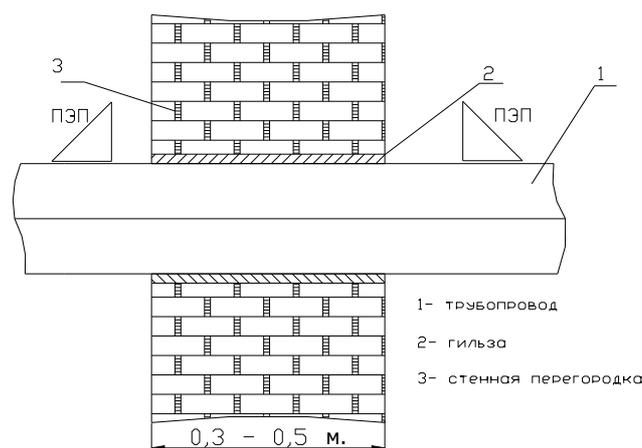


Рисунок 5 – Предлагаемая схема контроля

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного анализа дефектности можно сделать вывод о том, что наиболее характерным дефектом труб находящихся в межэтажных перекрытиях являются коррозионные повреждения и как следствие, сильное утонение стенки.

2. Для решения задачи проведения УЗ контроля трубопровода проходящего через межэтажные перекрытия была разработана оптимальная схема контроля волнами Лэмба.

3. Возможность ультразвукового контроля тонкостенных труб в межэтажных перекрытиях с применения волн Лэмба целесообразно исследовать на основе твердотельной модели дифракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин, Н.П. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. 1. Дифракция волн Лэмба. Плоскостной дефект / Н.П. Алешин, А.А. Дерябин // Сварка и диагностика. – 2007. – №4. – С. 24 – 26.
2. Алешин, Н.П. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба. 2. Дифракция волн Лэмба. Объемный дефект / Н.П. Алешин, А.А. Дерябин // Сварка и диагностика. – 2007. – №4. – С. 26 – 28.
3. Алешин, Н.П. Разработка критериев оценки типов дефектов сварных соединений тонкостенных труб волнами Лэмба / Н.П. Алешин, А.А. Дерябин // Контроль. Диагностика. – 2008. – №2. – С. 30 – 33.
4. Щербинский, В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 496 с.
5. Веревкин, В.М. Развитие ультразвуковых методов и средств автоматизированного контроля листового проката / В.М. Веревкин, С.К. Паврос // Известия ГЭТУ. – 1997. – Вып. 505. – С. 12 – 25.
6. Вopilкин, А.Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле. 1. Физические закономерности волн дифракции / А.Х. Вopilкин // Дефектоскопия. – 1985. – № 1. – С. 20 – 34.
7. Викторov, И.А. О диаграммах направленности излучателей волн Лэмба и Рэлея / И.А. Викторov, О.М. Зубова // Акустический журнал. – 1964. – № 4. – С. 171 – 175.

Зубарев Алексей Сергеевич

ОАО «АК «Транснефтепродукт»

Специалист 1 категории

142155, Московская область, Подольский район, поселок Львовский, улица Садовая, д. 7, кв. 43

тел. 8-926-568-39-43, (495)915-98-66

E-mail: aZubarev@aktnp.ru, alexey_zoubarev@list.ru;

Шкатов Петр Николаевич

ГОУ ВПО МГУПИ

доктор технических наук, профессор

107996, Москва, ул. Стомынка, д. 20

Тел. +7 903 6820269

E-mail: Petr_shkatov@mail.ru

A.S. ZUBAREV, P.N. SHKATOV

CHOOSING THE OPTIMAL SCHEME OF UT TESTING OF GAS AND WATER PIPES WITH LONG OPERATION LIFE AND PASSING THROUGH HIDDEN DIVISIONS IN APARTMENT HOUSES AND BUILDINGS

In the given work for choice the optimum scheme of ultrasonic control of gas and water pipes passing through interfloor overlappings researches are conducted in residential buildings and having the big term of operation. It has been established that characteristic defect of pipes being in interfloor overlappings are corrosion damages and as consequence, strong reduction of a thickness of a wall and the optimum scheme of control of the given pipes is developed by waves of Lemba. Also the question on expediency of application of solid-state model of diffraction for ultrasonic control of thin-walled pipes in interfloor overlappings from application of waves of Lemba is considered.

Key words: corrosion damage, echo-signal, Lamb waves, wall thinning, defect, ultrasonic testing, pipe, amplitude of echo-signal, piezoelectric transducer (PET).

BIBLIOGRAPHY

1. Aleshin, N.P. Razrabotka kriteriev ocenki tipov defektov svarnyh soedinenij tonkostennyh trub volnami Ljemba. 1. Difrakcija voln Ljemba. Ploskostnoj defekt / N.P. Aleshin, A.A. Derjabin // Svarka i diagnostika. – 2007. – №4. – S. 24 – 26.
2. Aleshin, N.P. Razrabotka kriteriev ocenki tipov defektov svarnyh soedinenij tonkostennyh trub volnami Ljemba. 2. Difrakcija voln Ljemba. Ob#emnyj defekt / N.P. Aleshin, A.A. Derjabin // Svarka i diagnostika. – 2007. – №4. – S. 26 – 28.
3. Aleshin, N.P. Razrabotka kriteriev ocenki tipov defektov svarnyh soedinenij tonkostennyh trub volnami Ljemba / N.P. Aleshin, A.A. Derjabin // Kontrol'. Diagnostika. – 2008. – №2. – S. 30 – 33.
4. Werbinskij, V.G. Ul'trazvukovoj kontrol' svarnyh soedinenij / V.G. Werbinskij, N.P. Aleshin. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2000. – 496 s.
5. Verevkin, V.M. Razvitie ul'trazvukovyh metodov i sredstv avtomatizirovannogo kontrolja listovogo prokata / V.M. Verevkin, S.K. Pavros // Izvestija GJeTU. – 1997. – Vyp. 505. – S. 12 – 25.
6. Vopilkin, A.H. Volny difrakcii i ih primenenie v ul'trazvukovom nerazrushajuwem kontrole. 1. Fizicheskie zakonomernosti voln difrakcii / A.H. Vopilkin // Defektoskopija. – 1985. – № 1. – S. 20 – 34.
7. Viktorov, I.A. O diagrammah napravlennosti izluchatelej voln Ljemba i Rjeleja / I.A. Viktorov, O.M. Zubova // Akusticheskij zhurnal. – 1964. – № 4. – S. 171 – 175.

Zubarev Aleksey Sergeevich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Sciences (MGUPI)

The expert of 1 category

142155, Moscow Region, Podolsk area, Settlement Lvovsky, Sadovaya street, 7, 43,

Tel.: +7 903 6820269

Shkatov Petr Nikolaevich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Sciences (MGUPI)

Doctor of technical science, professor,

107996 Moscow, Stromynka St. 20

Tel.: +7 903 6820269

E-mail: Petr_shkatov@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 624.14+539.37

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, О.В. КАЛАШНИКОВА

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ШВА ДВУХСЛОЙНЫХ СОСТАВНЫХ БАЛОК

В статье разработаны теоретические основы динамического метода контроля жёсткости горизонтального шва двухслойных составных балок.

Ключевые слова: контроль, жёсткость, горизонтальный шов, двухслойные составные балки.

Составные стержни и балки широко используются в строительстве, особенно при реконструкции зданий и сооружений, когда необходимо увеличить несущую способность конструкций из-за увеличения технологических нагрузок или усилить их в результате полученных повреждений при эксплуатации. Теория расчета таких конструкций разработана профессором А.Р. Ржаницыным [1].

Широко распространенными являются деревянные составные балки, слои которых соединяются между собой либо с помощью врубок, либо с помощью стальных нагелей (рис. 1, 2).

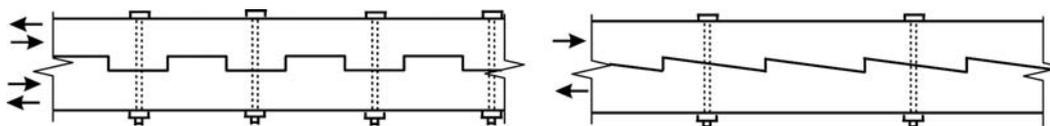


Рисунок 1 – Составные стержни на врубках

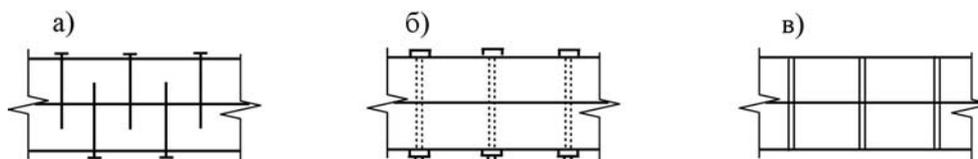


Рисунок 2 – Составные деревянные балки из бруса на цилиндрических нагелях
а – на гвоздях; б – на болтах; в – на цилиндрических стержнях

Расчёт двухслойных составных балок, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой q и работающих на поперечный изгиб, согласно [1] сводится к решению дифференциального уравнения упругой оси балки

$$y^{IV} - \lambda^2 y'' = q / \sum_{i=1}^2 E_i I_i + \lambda^2 M_0 / (E_0 I_0), \quad (1)$$

где y – прогиб балки в произвольном сечении;

M_0 – изгибающий момент в произвольном сечении;

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma}; \quad (2)$$

$$\xi = T_c n / \Gamma; \quad (3)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i} + \frac{c^2}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i}; \quad (4)$$

$$E_0 I_0 = \sum_{i=1}^2 E_i I_i + c^2 \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{\sum_{i=1}^2 E_i A_i}; \quad (5)$$

где ξ – коэффициент жесткости горизонтального шва;

T_c – сдвигающее усилие, приходящееся на одну связь;

n – число связей на единицу длины шва;

G – деформация взаимного сдвига смежных волокон двух соседних слоёв, соединенных связями сдвига;

q – интенсивность равномерно распределенной нагрузки;

E – модуль упругости материала;

A, I – соответственно площадь поперечного сечения и момент инерции каждого слоя балки;

c – расстояние между центрами тяжести слоёв составной балки;

Индексы 1 и 2 в выражениях (1) – (5) относятся к физическим и геометрическим характеристикам первого и второго слоёв балки.

Рассмотрим составную шарнирно опертую балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой q . Ввиду геометрической и физической симметрии заданной системы начало координат выберем в середине пролета (ℓ – половина пролета балки). Тогда

$$M_0 = \frac{q}{2}(\ell^2 - x^2)$$

и дифференциальное уравнение (1) примет следующий вид:

$$y^{IV} - \lambda^2 y'' = \frac{\lambda^2 q}{2} \cdot \frac{\ell^2 - x^2}{E_0 I_0} + \frac{q}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i}. \quad (6)$$

Решением этого уравнения с учетом симметрии будет интеграл [1]

$$y = C_1 ch\lambda\ell + C_2 + \frac{q}{E_0 I_0} \left(\frac{x^4}{24} - \frac{\ell^2 x^2}{4} + \frac{x^2}{2\lambda^2} \right) - \frac{qx^2}{2\lambda^2 \sum_{i=1}^2 E_i I_i}, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые находят, используя граничные условия на конце балки $y(\ell) = 0$ и $y''(\ell) = 0$:

$$C_1 = \frac{q}{\lambda^4 D ch\lambda\ell}, \quad C_2 = -C_1 ch\lambda\ell + \frac{5}{24} \frac{q\ell^4}{E_0 I_0} + \frac{q\ell^2}{2\lambda^2 D} = \frac{5q\ell^4}{24E_0 I_0} + \frac{q}{D} \left(\frac{\ell^2}{2\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^4} \right),$$

где $\frac{1}{D} = \frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} - \frac{1}{E_0 I_0}$. (8)

С учетом этих постоянных выражение (7) преобразуется к виду

$$y = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{ch\lambda x}{ch\lambda\ell} + \frac{\lambda^2}{2} (\ell^2 - x^2) - 1 \right] + \frac{q}{24E_0 I_0} (5\ell^2 - x^2)(\ell^2 - x^2). \quad (9)$$

В середине пролета (при $x = 0$) будем иметь:

$$y_0 = y_{max} = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{ch\lambda\ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5q\ell^4}{24E_0 I_0}. \quad (10)$$

С помощью зависимости (9), используя математический аппарат сопротивления материалов, можно найти все необходимые характеристики напряженно-деформированного состояния составной балки в любом её сечении, если известно значение параметра ξ . В реальных составных конструкциях балочного типа значение этого параметра практически всегда неизвестно. Поэтому одной из актуальных задач является разработка методов эксперимен-

тального определения коэффициента жесткости горизонтального шва в составных балках.

В настоящее время эта задача решается проведением статических испытаний составных балок или их фрагментов на сдвиг в продольном направлении с использованием зависимости (3). При проведении таких испытаний измеряют деформации взаимного сдвига смежных волокон соседних слоёв балки L . Этот способ весьма трудоёмок и не дает возможности определить коэффициент жесткости шва для составных балок, стоящих непосредственно в сооружении.

Решить эту задачу можно, используя зависимость (10) и установленную профессором В.И. Коробко в работе [2] фундаментальную закономерность в теории моделирования строительных и машиностроительных конструкций

$$y_0 \omega^2 = 1,268 q/m, \quad (11)$$

где m – погонная масса балки, которая связывает в аналитической форме величину максимального прогиба упругой однопролётной балки y_0 от действия равномерно распределённой нагрузки q с её основной частотой колебаний ω в ненагруженном состоянии.

Ценность этой закономерности заключается в том, что произведение $y_0 \omega^2$ не зависит от вида граничных условий, физических свойств материала, геометрических характеристик сечения и длины балки. Единственным обязательным условием её применения является работа балки в упругом состоянии.

Используя выражения (10) и (11) можно записать:

$$\frac{1}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{ch\lambda\ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5\ell^4}{24E_0 I_0} = 1,268 \frac{1}{m\omega^2}. \quad (12)$$

Полученное трансцендентное уравнение связывает неизвестный параметр λ с основной частотой колебаний составной балки ω , которую не сложно определить в контролируемой конструкции экспериментально. Используя способ итераций можно вычислить значение параметра λ , а с помощью зависимости (2) – значение коэффициента жесткости горизонтального шва ξ контролируемой балки.

Для реализации этого способа предложен алгоритм, который заключается в следующем:

- экспериментально определяется основная частота поперечных колебаний двухслойной составной балки ω ;
- рассчитываются значения приведённой изгибной жесткости $E_0 I_0$ и параметра $1/D$;
- аналитически по формуле (12) определяется значение параметра λ ;
- определяется коэффициент жёсткости шва ξ из выражения (2).

На первом этапе проверки эффективности предложенного способа проведен так называемый численный эксперимент на примере стальных ферм с параллельными поясами и регулярной решеткой. Такие фермы относятся к составным конструкциям балочного типа, в которых роль соединительного шва выполняет решётка ферм, и для них при небольших размерах панелей по верхнему поясу ферм формула (12) будет также справедлива. Выбор металлических ферм для этих целей объясняется тем, что для некоторых типов решёток (рисунков 3) в работе [1] получены точные аналитические зависимости для определения коэффициента жесткости решёток, а задача определения основной частоты колебаний ферм является достаточно простой задачей строительной механики.

Рассмотрим однопролётные шарнирно опертые по концам стальные фермы с параллельными поясами и регулярной решёткой (рисунок 3). Длина ферм $L = 2\ell = 12,0$ м, высота $C = 1,5$ м, длина панели B переменная от 0,5 до 2,0 м (с шагом 0,5 м); элементы верхнего и нижнего поясов выполнены из стальных труб 180×6 мм ($E_1 = E_2 = 2 \times 10^5$ МПа, $A_1 = A_2 = 16,68$ см², $I_1 = I_2 = 653,47$ см⁴), а элементы решётки – из труб 140×6 мм ($A_p = A_c = 12,91$ см², где A_p и A_c – площади поперечных сечений элементов решетки и стоек соответственно); погонные массы ферм: $m_1 = 89,18$ кг/м, $m_2 = 60,04$ кг/м, $m_3 = 52,24$ кг/м, $m_4 = 48,03$ кг/м. Требуется определить коэффициент жёсткости решетки (коэффициент жесткости шва составной конструкции) с ис-

пользованием предложенного метода.

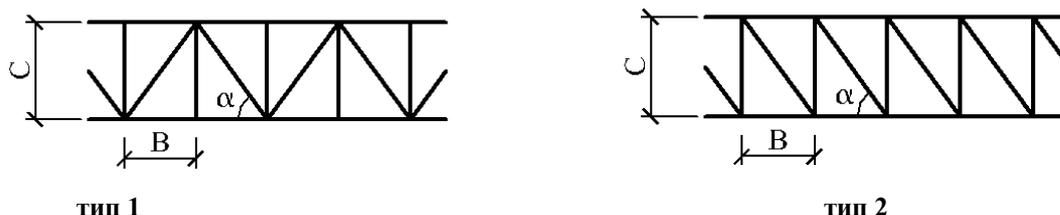


Рисунок 3– Типы исследуемых решеток ферм

Расчёт фермы для определения максимального прогиба выполнялся на ЭВМ с использованием программного комплекса «SCAD». Значения коэффициентов жесткости шва ξ рассчитывались путем последовательных приближений из уравнения (12) и по точным формулам А.Р. Ржаницына [1]:

– для решетки первого типа $\xi = EA_p \cos^3 \alpha / B^2$, (13)

– для решетки второго типа $\xi = E / \left[B^2 \left(\frac{\cos^{-3} \alpha}{A_p} + \frac{\operatorname{tg}^3 \alpha}{A_c} \right) \right]$. (14)

Результаты расчёта и сопоставления коэффициентов ξ сведены в таблицу.

Таблица 1 – Определение коэффициента жесткости решётки стальных ферм с параллельными поясами динамическим методом

Тип решетки фермы	Длина панели В, м	Основная частота колебаний ω , определённая расчетом, с^{-1}	Коэффициент ξ , рассчитанный по формуле (12), Па	Коэффициент ξ , рассчитанный по формулам (13) и (14), Па	Разница в значениях ξ , %
1	0,5	123,15	$8,672 \times 10^7$	$8,543 \times 10^7$	1,5
	1,0	154,73	$11,790 \times 10^7$	$11,530 \times 10^7$	2,3
	1,5	165,32	$10,340 \times 10^7$	$10,610 \times 10^7$	2,5
	2,0	166,96	$8,144 \times 10^7$	$8,645 \times 10^7$	5,8
2	0,5	111,46	$4,594 \times 10^7$	$4,608 \times 10^7$	0,3
	1,0	146,48	$7,415 \times 10^7$	$7,314 \times 10^7$	1,4
	1,5	159,60	$7,744 \times 10^7$	$7,840 \times 10^7$	1,2
	2,0	162,99	$6,686 \times 10^7$	$7,109 \times 10^7$	6,0

Анализ приведённых в таблице результатов, позволяет сделать следующие выводы:

– с помощью предложенного способа можно с удовлетворительной точностью определять значение коэффициента жесткости регулярной решетки ферм с параллельными поясами (горизонтального шва составных балок);

– точность предложенного способа возрастает с уменьшением длины панели В (с учащением расположения поперечных связей в составной балке) – увеличение длины панели от 0,5 до 2,0 м приводит к увеличению погрешности оценки ξ предложенным методом с 1,5 до 5,8 % для решетки первого типа и с 0,3 до 6,0 % для решетки второго типа.

Объяснить последний вывод можно не строгим выполнением закономерности (11) для ферм с большой длиной панели. Аналогичные выводы были получены и в работе [3], где экспериментально исследовались составные деревянные балки, соединяемые постепенно возрастающим количеством нагелей. С ростом числа нагелей значение коэффициента $C = y_0 \omega^2 m / q$ асимптотически приближалось к значению 1,268.

Проведенные теоретические исследования, таким образом, свидетельствуют, что

предложенный способ позволит контролировать жесткость горизонтального шва в двухслойных составных балках как в лабораторных или заводских условиях при изготовлении строительных конструкций балочного типа, так и в балках, находящихся в условиях эксплуатации. Для этого необходимо провести широкомасштабные эксперименты в условиях лаборатории, производства строительных конструкций на предприятиях строительной индустрии, а также в составных балках, находящихся в условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.
2. Коробко, В.И. Некоторые закономерности колебаний однопролетных балок / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №3. – С. 41-44.
3. Гвозков, П.А. Оценка жесткости деревянных и деревометаллических балок вибрационным способом: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / П.А. Гвозков; Орел, 2008. – 18 с.

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Зав. кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862)419876
E-mail: asms-orel@mail.ru

Калашникова Ольга Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Студентка группы П(б)-М 21
Тел. (4862)471066
E-mail: asms-orel@mail.ru

K. V. PODMASTERYEV, O. V. KALASHNIKOVA

THE DYNAMIC METHOD FOR EVALUATION OF RIGIDITY OF HORIZONTAL WELD TWO-LEAYER COMPOSITE OF BEAMS

The article describes theoretical basis of dynamic method for control of rigidity horizontal of weld to-layer composite of beams.

Key words: control, rigidity, horizontal weld, to-layer composite of beams.

BIBLIOGRAPHY

1. Rzhanicyn, A.R. Sostavnye sterzhni i plastinki / A.R. Rzhanicyn. – М.: Strojizdat, 1986. – 316 s.
2. Korobko, V.I. Nekotorye zakonomernosti kolebanij odnoproletnyh balok / V.I. Korobko // Izv. vu-zov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1988. – №3. – S. 41-44.
3. Gvozkov, P.A. Ocenka zhestkosti derevjannyh i derevometallicheskih balok vibracionnym sposobom: avto-ref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk / P.A. Gvozkov; Orel, 2008. – 18 s.

Podmasteryev Konstantin Valentinovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Head of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel.: 4862-419876
e-mail: asms-orel@mail.ru

Kalashnikova Olga Vladimirovna

State University – Education Science Production Complex, Orel
Student of group P(b)-M21
Tel.: 4862-471066
e-mail: asms-orel@mail.ru

И.О. КОБЗЕВ, Е.В. ПАХОЛКИН

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ СКОРОСТИ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ I.O.

В работе представлена математическая модель, описывающая интенсивность процесса деструкции граничных слоев смазочного материала. В качестве основного фактора деструкции смазочного материала рассматривается максимальная температура в зоне трения. Показаны связи интенсивности деструкции с условиями работы трибосопряжения, обоснована возможность применения электрических параметров для исследования рассматриваемого явления.

Ключевые слова: температура зоны трения, граничные слои смазочного материала, деструкция смазочного материала, электрические параметры.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] был предложен расчетно-экспериментальный метод контроля максимальной температуры в шарикоподшипнике. Данный метод предполагает использование параметров НИВ и СЧМ в качестве диагностических.

На основе данного метода предлагается расчетно-экспериментальный метод исследования процесса термической деструкции смазочного материала в узле трения (опорах качения).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как и в работах [1, 2], в данной статье рассматривается в качестве трибосопряжения радиальный шарикоподшипник, заполненный пластичным смазочным материалом и нагруженный некоторой постоянной радиальной нагрузкой. При этом соблюдаются следующие условия:

- наружное кольцо испытывает местное нагружение, внутреннее – циркуляционное;
- максимально нагруженный шарик совершает микропроскальзывание по поверхностям качения обоих колец;
- микропроскальзывание существует в пределах контурных площадей контакта шарика с поверхностями обоих колец;
- режим смазки – полужидкостный.

Требуется установить возможность оценки скорости термодеструкции смазочного материала, определяемой максимальной температурой зоны трения. При этом математическая модель, описывающая интенсивность термодеструкции, должна включать в себя экспериментально определяемые диагностические параметры электрической группы.

АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕНА ЗОНЫ ТРЕНИЯ

Известно, что в условиях высоконагруженного высокоскоростного режима трения поверхностей скользящий контакт их микровыступов сопровождается значительными приращениями температуры, приводящими к локальным разрушениям смазочной пленки [3]. Для оценки количества смазочного материала подвергшегося необратимым температурным превращениям при контакте двух микронеровностей поверхности является целесообразным определение вида теплообмена между фактическим пятном контакта и дисперсионной средой пластичного смазочного материала. Если рассматривать уровень деструкцию пластичного смазочного материала, то согласно [4], он целиком определяется уровнем деструкции дисперсионной среды.

Известно, что процесс переноса теплоты может осуществляться тремя видами:

- конвективным теплообменом, обусловленным совместным действием конвективного и молекулярного переноса теплоты;
- теплопроводностью, обусловленной молекулярным переносом теплоты в сплошной среде;

– теплообменом, вызванным действием электромагнитного излучения инфракрасного диапазона [5].

При теплообмене в реальных условиях тепловая энергия передается всеми тремя видами теплообмена (сложный теплообмен). Однако расчет температурного поля пространства, учитывающий все три (или даже два) вида теплообмена, является достаточно сложной задачей, решаемой в большинстве случаев с использованием численных методов. Вследствие этого представляет интерес количественная оценка вклада каждого вида теплопереноса в сложный теплообмен.

Для установления количественных соотношений между видами теплообмена можно воспользоваться критериями подобия, а именно критерием Пекле и критерием Больцмана.

Критерий Пекле для среды характеризует отношение тепловой энергии, переносимой конвекцией, к тепловой энергии, переносимой теплопроводностью. Применительно к поставленной задаче численно он может быть определен как

$$Pe = \frac{v_{\text{СК}} \cdot d_r}{a_{\text{СМ}}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{СМ}}$ – скорость движения дисперсионной среды смазочного материала (принимается равной скорости относительного перемещения поверхностей при трении $v_{\text{СК}}$);

d_r – средний диаметр пятна контакта;

$a_{\text{СМ}}$ – коэффициент температуропроводности дисперсионной среды.

Согласно [2] скорость относительного перемещения поверхностей при трении, а, следовательно, и скорость движения дисперсионной среды может быть оценена как

$$v_{\text{СМ}} = \frac{d_r}{t_{\text{T}}}, \quad (2)$$

где t_{T} – время цикла трения.

Данный параметр может быть определен экспериментально как отношение нормированного интегрального времени электрического контактирования (НИВ) к средней частоте микроконтактирований (СЧМ) [2].

В итоге для разных режимов работы трибоузла (разных значений t_{T}), определяемых парами значений НИВ и СЧМ в соответствии с моделью, изложенной в работах [1, 2], минимальное и максимальное значения числа Пекле, соответствующие максимальному и минимальному значениям t_{T} , равны, соответственно, $Pe_{\text{МИН}} = 9 \cdot 10^3$, $Pe_{\text{МАКС}} = 6,8 \cdot 10^{11}$.

Критерий Больцмана характеризует отношение тепловой энергии, переносимой конвекцией, к тепловой энергии, переносимой посредством электромагнитного излучения. Применительно к поставленной задаче данный критерий может быть определен по формуле

$$Bo = \frac{\rho_{\text{СМ}} \cdot c_{\text{СМ}} \cdot v_{\text{СМ}}}{k \cdot T_{\text{max}}^3}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{СМ}}$ – плотность дисперсионной среды смазочного материала;

$c_{\text{СМ}}$ – теплоемкость дисперсионной среды смазочного материала;

k – постоянная Больцмана;

T_{max} – температура фактического пятна контакта.

Минимальное значение данного критерия соответствует минимально допустимому значению скорости движения смазочного материала $v_{\text{СМ}}$ и максимальному значению температуры T_{max} . В соответствии с (2) минимальное значение скорости смазочного материала соответствует максимальному времени цикла трения, которое в свою очередь соответствует максимальному значению температуры T_{max} . Также минимальному значению времени трения соответствует минимальное значение T_{max} . В итоге минимальное и максимальное значения критерия равны соответственно $Bo_{\text{МИН}} = 2,9 \cdot 10^{21}$, $Bo_{\text{МАКС}} = 3,9 \cdot 10^{34}$.

Исходя из полученных значений чисел Пекле и Больцмана, можно предполагать, что конвективный теплообмен в дисперсионной среде смазочного материала составляет более 99 % всего теплообмена. Таким образом, при моделировании теплообмен в дисперсионной среде за счет теплопроводности и излучения можно не рассматривать.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

Сделаем допущение, что термодеструкции подлежат прежде всего молекулы, находящиеся в непосредственном контакте с источником температурной вспышки.

Известно, что при взаимодействии жидкости и твердого тела на поверхности последнего образуется адсорбционный слой. По данным работы [6] процесс адсорбции протекает с высокой скоростью. Причем адсорбция может быть более или менее прочной в зависимости от ее природы (следствие слабых Ванн-дер-Ваальсовских сил или прочные связи как результат химической адсорбции).

При адсорбции молекул дисперсионной среды на поверхности фактического пятна контакта температурному воздействию подвергаются в первую очередь те молекулы смазочной среды, которые адсорбируются непосредственно после контакта. В этот начальный момент времени температура фактического пятна контакта только начинает уменьшаться, и ее можно принять равной максимальной температуре, оцениваемой методом, изложенным в работах [1, 2].

За интервал времени, называемый начальным, в данной работе, принимается время, равное половине времени цикла трения t_T . Этот временной интервал является разностью моментов времени окончания скользящего контакта и времени начала контактирования нагретой поверхности пятна контакта с дисперсионной средой. В течение же дальнейшего цикла охлаждения происходит образование оксидной пленки на поверхности пятна, что, согласно [4], делает поверхность пятна контакта практически не влияющей на скорость окисления дисперсионной среды. Кроме того температура в течение цикла охлаждения будет падать по закону Ньютона, для описания которого необходимо знать коэффициент теплоотдачи, зависящий от множества различных факторов и в большинстве случаев определяемого эмпирически.

Таким образом, задача сводится к определению количества молекул, успевших прореагировать с поверхностью фактического пятна контакта за время, равное половине времени цикла трения.

Согласно [3] продолжительность пребывания молекул смазочного материала в адсорбированном состоянии можно оценить по формуле Я.И. Френкеля:

$$t_{ож} = t_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{R \cdot T}}, \quad (4)$$

где t_0 – период колебания молекулы около положения равновесия;

ΔE – приращение энергии, необходимое для преодоления потенциального барьера, разделяющего два соседних положения равновесия;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Период колебания молекулы около положения равновесия можно оценить как величину, обратную частоте поглощения этой молекулой электромагнитного излучения. Известно, что электромагнитное излучение поглощается только теми молекулами, собственные частоты колебаний которых совпадают с частотами падающего излучения. Под собственной частотой молекулы понимается совокупность частот колебаний атомов, составляющих молекулу, а также связей между этими атомами. По данным работы [7] при исследовании органических соединений методом спектроскопии чаще всего используют излучение в области длин волн от 2 до 50 мкм (соответствует волновым числам от 5000 до 200 см⁻¹).

Необходимо отметить, что поглощение излучения смазочными материалами осуществляется на множестве характерных частот. Например, спектр поглощения ИК-излучения широко используемым пластичным смазочным материалом Литол-24 в диапазоне волновых чисел от 0 до 3500 см⁻¹ имеет вид, показанный на рисунке 1 (работа [8]).

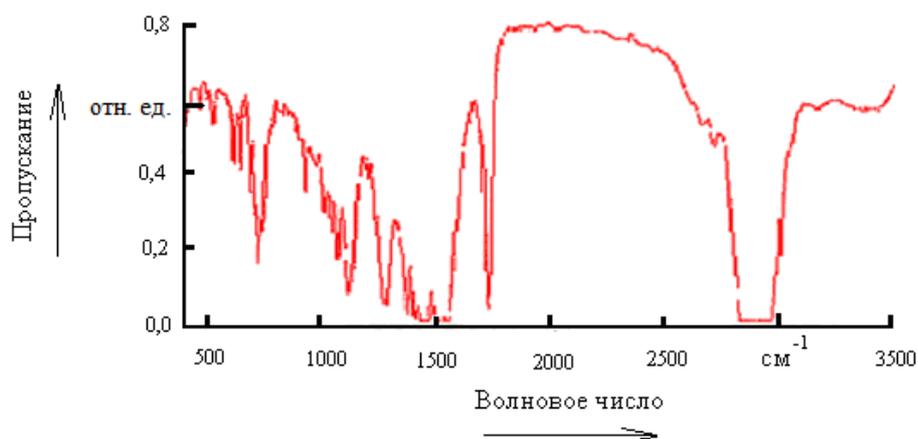


Рисунок 1 – Спектр поглощения ИК-излучения смазочным материалом Литол-24

Сложность представленной картины объясняется многокомпонентным составом смазочных сред – присутствием нескольких видов молекул, обладающих различными частотами колебаний около положения равновесия. Упростить использование выражения (4) можно, допуская возможность усреднения параметра t_0 на основании априорной информации о веществах, молекулы которых составляют дисперсионную среду.

Величина ΔE также имеет физический смысл лишь при условии идентичности всех частиц среды [9]. Применительно к смазочным материалам численно значение ΔE может быть оценено по формуле

$$\Delta E = 2,303 \cdot R \cdot \lg \alpha_T \cdot \left(\frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \right), \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

α_T – температурный коэффициент объемного расширения базового масла;

T_1, T_2 – минимальная и максимальная температура, в пределах которых определено усредненное значение коэффициента объемного температурного расширения и в пределах, которых определяется среднее значение энергии активации вязкого течения [9].

Температурный коэффициент объемного расширения можно определить по справочным данным для дисперсионных сред пластичных смазочных материалов [10].

Диапазон температур задается исходя из температуры, для которой необходимо рассчитать энергию активации вязкого течения. При этом допускается, что температурный коэффициент объемного расширения постоянен в широком диапазоне температур.

Для того чтобы оценить количество молекул, подвергаемых температурному воздействию на некоторой фактической площади, необходимо знать размеры самих молекул. Ввиду того, что смазочные материалы состоят из молекул, различающихся по форме и размерам, также целесообразной является оценка некоторого среднего размера молекулы.

Моделируя молекулы округлой формой, их средний диаметр можно определить по формуле

$$D_{cp} = 8 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_{cp}}{4 \cdot \pi \cdot \rho_M}}, \quad (6)$$

где m_{cp} – средняя масса молекулы дисперсионной среды;

ρ_M – плотность дисперсионной среды.

Для оценки средней массы молекулы смазочного материала целесообразно использовать методы упрощенной аналитической оценки, основанные на моделях Войнова и Крега. Причем, при использовании формулы Войнова необходимо располагать сведениями о температуре кипения смазочного материала – параметра, который не входит в перечень основных параметров смазочных масел и в большинстве случаев его определение представляется

сложной задачей. Поэтому для оценки средней массы молекулы дисперсионной среды предлагается использовать формулу Крега:

$$m_{\text{ср}} = \frac{44,29 \cdot \rho_{\text{M15}}}{1,03 - \rho_{\text{M15}}}, \quad (7)$$

где ρ_{M15} – плотность дисперсионной среды при температуре 15°C .

Пренебрегая разностью плотностей дисперсионной среды при температуре 15°C и 20°C , и подставляя выражение (7) в (9) можно получить:

$$D_{\text{ср}} = 8 \cdot \sqrt[3]{\frac{132,87 \cdot \rho_{\text{M}}}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{M}} \cdot (1,03 - \rho_{\text{M}})}}. \quad (8)$$

Средняя площадь проекции молекулы округлой формы на плоскую поверхность будет определяться в соответствии с выражением

$$S_{\text{ср}} = \pi \cdot 4 \cdot \left(\frac{132,87 \cdot \rho_{\text{M}}}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{M}} \cdot (1,03 - \rho_{\text{M}})} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (9)$$

Соотнеся суммарную фактическую площадь контакта с площадью, рассчитываемой по формуле (9), можно оценить среднее число молекул смазочного материала, способных одновременно контактировать с фактической площадью пятна контакта и, следовательно, подвергающихся воздействию максимальной температуры:

$$N_{\text{ср}} = \frac{A_r}{S_{\text{ср}}}. \quad (10)$$

В итоге, за время, равное половине цикла трения, температурному воздействию подвергнется среднее число молекул равное

$$N_{(t_{\text{T}}/2)\text{ср}} = \frac{t_{\text{T}}}{t_{\text{ож}}} N_{\text{ср}}. \quad (11)$$

При стационарной средней частоте микроконтактирований количество молекул дисперсионной среды, взаимодействующих с фактической площадью пятна контакта в единицу времени, может быть представлено выражением

$$v = N_{(t_{\text{T}}/2)\text{ср}} \cdot \text{СЧМ}. \quad (12)$$

Для оценки скорости деструкции молекул дисперсионной среды, подвергающихся воздействию температуры, можно воспользоваться уравнением Аррениуса в следующем виде:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{t_0} \cdot e^{\left(-\frac{\Delta E_p}{R \cdot T} \right)}. \quad (13)$$

где τ – время, необходимое для деструкции смазочной среды при заданной температуре и энергии активации химической реакции;

ΔE_p – энергия активации химической реакции.

Энергия активации химической реакции является константой для каждой реакции.

Логично предположить, что каждая молекула смазочного материала, вступившая в контакт с поверхностью, может подвергаться деструкции, а вероятность данного события может быть определена по формуле

$$\Delta = \left(1 - \frac{\tau - t_{\text{ож}}}{\tau} \right) \cdot 100\%. \quad (14)$$

На основании выражения (14) можно записать, что дисперсионная среда, в момент времени t будет иметь относительный текущий уровень термической деструкции, определяемый как

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{N_{(t_T/2)_{\text{ср}}} \cdot \text{СЧМ} \cdot t}{N_{\Sigma}} \left(1 - \frac{\tau - t_{\text{ож}}}{\tau} \right) \cdot 100\% . \quad (15)$$

где N_{Σ} – суммарное количество молекул жидкой фракции смазочного материала в узле трения;
 t – текущее время работы трибоузла.

Величина N_{Σ} может быть оценена как отношение массы жидкой фракции смазочного материала к средней массе молекулы, определяемой согласно (7). Учитывая выражения (4, 10, 11, 13), а также зависимость температуры и фактической площади от параметров НИВ и СЧМ, представленную в работах [1, 2], можно записать

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{\text{НИВ} \cdot A_r(\text{НИВ, СЧМ}) \cdot t}{t_0 \cdot S_{\text{ср}} \cdot N_{\Sigma}} e^{-\frac{\Delta E_p}{R \cdot T(\text{НИВ, СЧМ})}} \cdot 100\% . \quad (16)$$

ВЫВОДЫ

Максимальная температура в зоне трения является основным фактором деструкции смазочных материалов в локальных объемах на поверхностях трения, ограниченных площадью точечного температурного источника, являющегося следствием температурной вспышки. При этом целесообразно рассматривать деструкцию адсорбированных граничных слоев смазочного материала.

На вероятность деструкции молекул смазочного материала влияет соотношение времени нахождения смазочного материала в контакте с поверхностью и времени, необходимого для деструкции при определенной температуре и энергии активации химической реакции (для конкретного химического элемента).

Количество потенциальных молекул смазочной среды, которые могут быть подвергнуты термодеструкции, можно приближенно оценить с учетом соотношения их размеров с площадью пятна контакта.

Ряд параметров, входящих в описание процесса термодеструкции смазочного материала, могут быть определены экспериментально электрическим методом через параметры электрического сопротивления фрикционного контакта (НИВ и СЧМ).

Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”, код проекта 10423.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. – № 6 – С. 143-150.
2. Пахолкин, Е.В. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы [Текст] / Е.В. Пахолкин, И.О. Кобзев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. – № 6-2 (284). – С. 34-40.
3. Буяновский, И.А. Три стадии проявления температурной вспышки при трении [Текст] / И.А. Буяновский, Б.Э. Гурский // *Трение и износ* – 1998. – Т.19, №2 – С. 187-193.
4. Мельников, В.Г. Работоспособность и кинетические закономерности трибохимических превращений пластичных смазок в зоне трения-качения [Текст] / В.Г. Мельников // *Трение и износ* – 2004. – Т. 26, №1. – С. 58-73.
5. Юдаев, Б.Н. Теплопередача: учебник [Текст] / Б.Н. Юдаев. – М.: Высшая школа, 1973. – 360 с.: ил.
6. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст]: научное издание / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.: ил.
7. Казицына, Л.А. Применение УФ, ИК, ЯМР и масс-спектропии в органической химии [Текст] / Л.А. Казицына, Н.Б. Куплетская. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 240 с.
8. Тихомиров, П.В. Работоспособность пластичного смазочного материала [Текст] / П.В. Тихомиров, В.П. Тихомиров // *Вестник Брянского государственного технического университета* – 2010. – Т. 26, №2. – С. 46-49.
9. Геллер, Б.Э. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров [Текст] / Б.Э. Геллер, А.А. Геллер, В.Г. Чиртулов. – М.: Химия, 1996. – 432 с.: ил.
10. Фройштетер, Г.Б. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок [Текст] / Г.Б. Фройштетер, К.К. Триликий, Ю.Л. Ишук, П.М. Ступак. – М.: Химия, 1980. – 176 с.: ил.

Кобзев Илья Олегович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. 89208085387
E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

Пахолкин Евгений Васильевич

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел
Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Кандидат технических наук, доцент
Тел. 89208112686
E-mail: eugene_p@bk.ru

I.O. KOBZEV, E.V. PAKHOLKIN

ABOUT PROBE POSSIBILITY OF SPEED OF DESTRUCTION THE GREASES BY THE ELECTRIC METHOD, IN THE DEFINED MAXIMUM TEMPERATURE IN THE FRICTION ZONE

In operation the mathematical model describing intensity of process of destruction of boundary layers of lubricant is presented. As a pacing factor of lubricant destruction the maximum temperature in a friction zone is considered. Intensity communications of destruction with working conditions of frictional contact are shown, possibility of application of electrical parameters for research of the considered phenomenon is justified.

Keywords: *temperature of a friction zone, boundary layers of lubricant, lubricant destruction, electrical parameters.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temeperatury v sharikopod-shipnike. Chast' 1. Matematicheskaja model' maksimal'noj temperatury [Tekst] / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6 – S. 143-150.
2. Paholkin, E.V. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temperatury v sharikopodshipnike. Chast' 2. Primenenie diagnosticheskikh parametrov jelektricheskoy grupy [Tekst] / E.V. Paholkin, I.O. Kobzev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. – № 6-2 (284). – S. 34-40.
3. Bujanovskij, I.A. Tri stadii pojavlenija temperaturnoj vspyshki pri trenii [Tekst] / I.A. Bujanovskij, B.Je. Gurskij // Trenie i iznos – 1998. – T.19, №2 – S. 187-193.
4. Mel'nikov, V.G. Rabotosposobnost' i kineticheskie zakonomernosti tribohimicheskikh prevrachenij plastichnyh smazok v zone trenija-kachenija [Tekst] / V.G. Mel'nikov // Trenie i iznos – 2004. – T. 26, №1. – S. 58-73.
5. Judaev, B.N. Teploperedacha: uchebnik [Tekst] / B.N. Judaev. – M.: Vysshaja shkola, 1973. – 360 s.: il.
6. Chichinadze, A.V. Trenie, iznos i smazka (tribologija i tribotehnika) [Tekst]: nauchnoe izdanie / A.V. Chichinadze, Je.M. Berliner, Je.D. Braun [i dr.]; pod obw. red. A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 576 s.: il.
7. Kazicyna, L.A. Primenenie UF, IK, JaMR i mass-spektroskopii v organicheskoy himii [Tekst] / L.A. Kazicyna, N.B. Kupletskaja. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1979. – 240 s.
8. Tihomirov, P.V. Rabotosposobnost' plastichnogo smazochnogo materiala [Tekst] / P.V. Tihomirov, V.P. Tihomirov // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – 2010.– T. 26, №2. – S. 46-49.
9. Geller, B.Je. Praktičeskoe rukovodstvo po fizikohimii voloknoobrazujuwih polimerov [Tekst] / B.Je. Geller, A.A. Geller, V.G. Chirtulov. – M.: Himija, 1996. – 432 s.: il.
10. Frojshteter, G.B. Reologičeskie i teplofizicheskie svojstva plastichnyh smazok [Tekst] / G.B. Frojshteter, K.K. Triliskij, Ju.L. Iwuk, P.M. Stupak. – M.: Himija, 1980. – 176 s.: il.

Kobzev Ilya Olegovich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”
Tel.: 89208085387
e-mail: K87-I07O19@yandex.ru

Paholkin Eugeny Vasilievich

State University – Education Science Production Complex, Orel
Associate professor of department „Instrument engineering, metrology and certification“
Candidate of technical science, associate professor
Tel.: 89208112686
e-mail: eugene_p@bk.ru

В.В. МИШИН, Е.Н. МОЛОДЦОВ

К ВОПРОСУ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИЯ РВС И МОДИФИКАТОРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

В статье представлено научное обоснование возможности диагностирования трибосопряжений при их обработке ремонтно-восстановительными составами и модификаторами. Представлена краткая классификация РВС и модификаторов. Проведен анализ составляющих электрического сопротивления трибосопряжения при наличии модификаций поверхностного слоя. Подтверждено, что действие РВС и модификаторов можно трактовать как изменение фактической площади контактов микронеровностей трибосопряжения с последующим изменением сопротивления стягивания. При измерении электрического сопротивления трибосопряжения производится косвенная оценка действия РВС при работе трибосопряжения.

Ключевые слова: трибосопряжение, сопротивление трибосопряжения, модификатор.

Ремонтно-восстановительные составы (РВС) и модификаторы поверхностей трения в настоящее время находят широкое применение как в государственном автопарке, так и в автохозяйствах других форм собственности. Согласно современным взглядам, действие РВС и основных видов модификаторов поверхностей основано на изменении поверхностного слоя трибосопряжения, что, в свою очередь, приводит к изменениям условий трения.

Настоящая работа посвящена теоретической оценке возможности диагностирования процесса восстановления поверхности группой ремонтно-восстановительных составов и модификаторов на основе минералов. Согласно гипотезе, их действие заключается в образовании на восстанавливаемой поверхности устойчивого изоморфного металлокерамического слоя с высокой микротвердостью и износостойкостью. Этот слой имеет выраженные диэлектрические свойства, поэтому принципиальная возможность диагностирования электрическим методом присутствует. Для решения поставленной задачи рассмотрена краткая классификация РВС и модификаторов, на основании известных научных источников разработана структура математической модели трибосопряжения с учетом действия РВС и модификаторов.

Краткая обобщенная классификация ремонтно-восстановительных составов (РВС) и модификаторов по группам: 1) реметаллизанты (иногда говорится «риметаллизанты» – особенность перевода с английского языка); 2) тефлоносодержащие РВС; 3) эпилантные противозносные РВС; 4) хлорпарафиновые кондиционеры металлов; 5) мелкодисперсные модификаторы с твердыми включениями; 6) модификаторы трения на основе слоистых материалов; 7) РВС на основе минералов.

Реметаллизанты (группа 1) в основной своей массе содержат мелкодисперсные порошки или ионы антифрикционных металлов. Физика процесса восстановления поверхности и изменений условий работы трибосопряжения состоит в заполнении впадины между гребешками шероховатостей деталей трибосопряжения мелкодисперсными частичками металла. При этом меняется «гладкость» поверхности слоя, происходит перераспределение давления в зоне трения, меняется режим трения. Так называемый «плакирующий» слой является слоем мягкого металла, удерживаемого на поверхности детали трибосопряжения механическими силами. Данный слой в силу природы взаимодействия с поверхностью основного металла не может считаться устойчивым, так как действующим веществом реметаллизанта является металл, содержащийся в смазочном материале. Таким образом, на первом этапе восстановления поверхности диагностирование процесса восстановления электрическим способом затруднительно – смазочный материал электропроводен и общее электрическое сопротивление зоны трения будет формироваться не фактической площадью контакта и сопротивлением стягивания, а электропроводностью смазочного материала. Оценка изменения состояния восстанавливаемой поверхности возможна после изъятия смазочного материала с мелкодисперсным

металлом (после промывки). В этом случае электрическое сопротивление трибосопряжения будет определяться новой геометрией контактирующих поверхностей и будет нести в себе диагностическую информацию о качестве восстановления.

Действие РВС групп 2-5,7 в отличие от реметаллизантов можно оценить с помощью электрических методов диагностирования, в частности, по изменению временной функции электрического сопротивления трибосопряжения и ее параметров (среднее значение, дисперсия, спектральный состав, корреляционная и характеристическая функция и т.д.). Большинство реагентов, входящих в РВС групп и 2-5,7 являются диэлектриками (эпиламные реагенты, хлоропарафиновые соединения, искусственные мелкодисперсные алмазы, минеральные серпентиновые материалы). Модификаторы группы 6 аналогичны с точки зрения диагностирования электрическими методами реметаллизантам, т.к. в их основе часто используется графит, т.е. электропроводный материал.

Для получения и распознавания диагностической информации на базе известных моделей трибосопряжения [1-4] синтезирована математическая модель, учитывающая действие РВС и модификаторов.

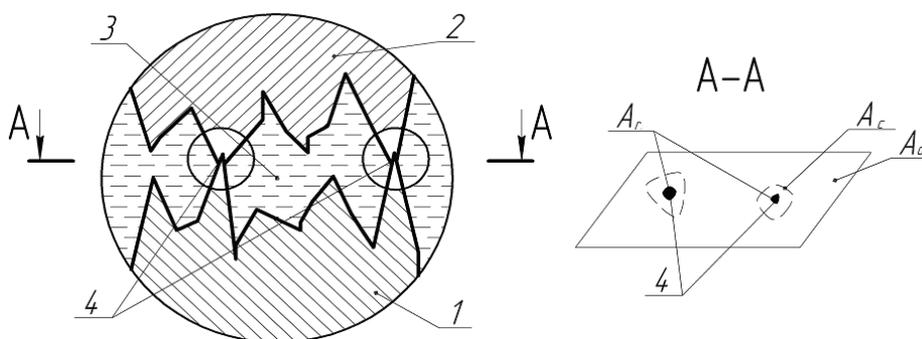


Рисунок 1- Модель трибосопряжения

1,2 – детали трибосопряжения; 3 – смазочный слой;
4 – зоны непосредственного контакта металл – металл

Как видно из упрощенной схемы трибосопряжения (рис. 1), электрическое сопротивление трибосопряжения формируется с учетом следующих факторов: величина номинальной площади контакта A_a , величина контурной площади контакта A_c , величина площади локальных фактических площадок контакта A_r . Под номинальной площадью контакта понимается площадь, определяемая геометрическими параметрами детали (например, в подшипниках качения – это эллипс контакта). Контурная площадь формируется площадями касания волн контактирующих деталей. Фактическая площадь контакта определяется непосредственно контактом шероховатостей. Теоретически при разработке модели трибосопряжения микронеровности поверхности моделируются набором сферических сегментов, вершины которых распределены по высоте таким образом, чтобы соответствовать опорной кривой и реальному закону распределения материала в слое микронеровностей.

В общем виде сопротивление трибосопряжения определяется как R_{Σ} :

$$R_{\Sigma} = R_M + R_{оп} + R_{ст} + R_{сп}, \quad (1)$$

где R_M – сопротивление металлического слоя;

$R_{оп}$ – сопротивление окисных пленок;

$R_{ст}$ – сопротивление стягивания;

$R_{сп}$ – сопротивление смазочных пленок.

Тонкая пленка смазочного материала в зоне трения часто имеет свойства многослойного кристаллического образования с высокой упругостью. Она способна выдерживать без разрушения большие нормальные давления. Однако при трении шероховатости тел в зоне контакта микронеровностей, на фактической площади контакта (ФПК), особенно в процессе

приработки (до достижения равновесной шероховатости), это свойство можно не учитывать, так как происходит пластическое деформирование микронеровностей. Соответственно второй и четвертый члены выражения (1) минимизируются.

В случае граничного режима трения существуют моменты времени, когда детали трибосопряжения практически разделяются смазочным материалом. В этом случае последний член выражения (1) минимизируется.

Допущением моделирования является предположение, что при граничном трении большинство микронеровностей контактируют упруго или упруго-пластически (незначительная часть). В литературе известно несколько критериев перехода от упругой деформации к пластической применительно к микронеровностям, например критерий И.В.Крагельского, критерий Д.А. Рудзита и др. (таблица 1) [2]. Для упрощения в первом приближении и считаем, что $R_{\Sigma} \approx R_{cm}$ [2].

Таблица 1 – Критерии перехода от упругой деформации к пластической

№	Автор	Выражение	Примечание
1	И.В.Крагельский	$\frac{\delta}{r} = 2,4 \cdot \left(\frac{H}{E}\right)^2$ r – радиус неровности в вершине	При контурном давлении: $q_c \leq \frac{2,4^{v+0,5} \cdot v(v-1)K_1 H^{2v+1}}{5E^{2v} \cdot \Delta v}$ v – параметр опорной кривой; K_1 – коэффициент ($K_1 = K_1(v)$); Δ – комплексный параметр шероховатости; Контакт будет упругим.
2	Гринвуд, Вильямсон	$\delta = \frac{\pi^2 q_0^2 \beta}{4 E^2}$ $q_0 = 0,6H$, где H – твердость	Критическое сближение (упругая деформация): $\delta_p = 0,89\beta \left(\frac{H}{E}\right)^2$ С учетом запаса: $\delta_p = \beta \left(\frac{H}{E}\right)^2$ $\delta^* = \frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{H}{E}\right)^2 = \frac{\delta_p}{\sigma}$
3	Критерий «на индексе пластичности» (основан на п.2)	$\psi = \frac{l}{\sqrt{\delta^*}} = \frac{E}{H} \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}}$	$\psi < 0,6$ – контакт упругий $\psi > 1$ – контакт пластический $0,6 < \psi < 1$ – упругопластическая деформация
4	Я.Н. Рудзит	$KK = \frac{HQ S_m}{R_a}$ Q – упругая постоянная	Вероятность упругой деформации 95%, если: $KK \geq 1,74$

Наиболее удобными для моделирования являются два последних критерия. Так при воздействии РВС на поверхность материала трибосопряжения (заполнения впадин микронеровностей изоморфным слоем) изменяется шероховатость R_a (уменьшается). Так как общая структура микропрофиля не меняется, то средний шаг микронеровностей не изменяются при действии РВС. Соответственно, коэффициент КК пропорционально увеличивается, что говорит о увеличении доли упруго деформируемых микронеровностей в пределах фактической площади контакта. Это объясняется перераспределением давления в зоне трения за счет изменения сближения поверхностей при заполнении впадин реагентами РВС (рис. 2). В качестве примера, на рисунке 3 представлены микрофотографии смазки с видимыми микрочастицами реагента.

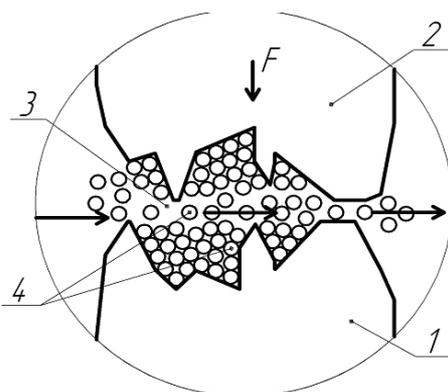


Рисунок 2 – Условная схема действия РВС

1,2 – детали трибосопряжения; 3 – смазочный материал с РВС или модификатором; 4 – изоморфный слой реагента РВС (металлокерамика)



Рисунок 3 – Микроскопические фотографии смазки с РВС

Без учета действия РВС радиус площади контактирования микронеровности в случае ее представления в виде полусферы определяется как [2,3]:

$$r = 0,9 \sqrt{\frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \cdot N, \quad (2)$$

а давление в области контакта определяется как:

$$P_{\max_i} = 0,58 \sqrt{\frac{R1 + R2}{R1 \cdot R2} \cdot \frac{N}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}}, \quad (3)$$

где $R1, R2$ – радиусы контактирующих сфер микронеровностей;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга;

N – нормальная нагрузка в i -м контакте.

Сближение в контакте определяется как:

$$a_{ii} = 0,825 \cdot \sqrt[3]{\frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} \cdot N^2. \quad (4)$$

Для оценки параметров контактирования необходимо оценить нагрузку на единичный микровыступ. По рекомендации [3] она определяется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Нагрузка на единичный контакт

Вид контакта	Зависимость	Примечание
Упругий контакт	$N_i = 1.33 \frac{r^{0.5} h_{max}^{3/2}}{1 - \mu^2} a_i^{3/2} \frac{E}{E}$ <p>h_{max} – максимальная высота неровностей</p>	Нагрузка на n – контактов $N = \int_0^n N_i dn_r$
Пластический контакт	$N_i = 2\pi r h_{max} C\sigma_s a_i$ <p>$r = R1 = R2$</p>	Нагрузка на n – контактов $N = C\sigma_s A_c b a^v$ <p>$C\sigma_s = H$ – твердость по Бринеллю; σ_s – предел текучести</p>

Для определения распределения давления в зоне трения по контактам i -х микронеровностей необходимо определить среднеевероятное число контактирующих микронеровностей. По рекомендации [4] число контактов определяется как:

$$z = \frac{A_c F_1 F_2}{\pi r_{ПР} r_{ПОП}} k_2 a^{m_1}, \quad (5)$$

где k_2 – коэффициент способа обработки ($k_2 = 0,002$);

$r_{ПР}, r_{ПОП}$ – радиусы закрепления вершин, в продольном и поперечном направлении;

m_1 – коэффициент, определяемый в зависимости от структурных параметров микронеровностей;

F_1, F_2 – коэффициенты, выбираемые в зависимости от качества обработки контактирующих поверхностей.

Обработка РВС контактирующих поверхностей будет сказываться на числе контактирующих микронеровностей посредством учета заполнения впадины реагентом РВС путем изменения значений коэффициентов F_1, F_2, k_2 . При одинаковом способе обработки поверхности деталей трибосопряжений с учетом допущений моделирования можно принять равенство $r_{ПР} = r_{ПОП} = R1 = R2 = r$. Тогда выражение (5) будет иметь вид:

$$z = \frac{A_c F_1 F_2 k_2 a^{m_1}}{\pi \cdot r^2}. \quad (6)$$

С учетом вышесказанного определяется электрическое сопротивление стягивания в трибосопряжении. Для разных условий деформирования микронеровностей расчетные выражения сведены в таблицу 3 [2].

Как видно из выражений таблицы 3, сопротивление стягивания в контакте в основном определяется контурной и фактической площадями контакта с учетом числа контактов, на которые в свою очередь влияет РВС в процессе обработки деталей трибосопряжения. Более детально это влияние можно оценить по следующей зависимости [3]:

– для упругого взаимодействия относительная площадь контакта:

$$\frac{A_{r_{упр}}}{A_c} = \left[\frac{2.35 b^{2v} r^{1/2} \cdot (1 - \mu)^2 N}{2^{0.5v} k_2 h_{max}^{0.5} E A_c} \right]^{2v-1}, \quad (7)$$

где b, v – коэффициенты, характеризующие опорную кривую;

r – радиус кривизны вершин выступов;

h_{max} – максимальная высота неровностей;

k_2 – коэффициент, определяемый по опорной кривой от v .

Таблица 3 – Выражения для определения $R_{ст}$

№	Вид контакта	Расчетная зависимость	Примечание
1	Упругий, пластиче-ский	$R_c = \frac{\rho}{2nA_r} + \frac{\rho}{2A_c}$ n – число групп контактов, в первом при-ближении; n=z	Автор: Р.Хольм
2	Упругий, пластиче-ский	$R_c = \frac{\rho}{2nA_r} + \frac{16\rho}{3\pi A_c}$	Автор: В.А.Гринвуд
3	Упругий, пластиче-ский (с учетом класте-ров)	$R = \frac{\rho}{n_k} \left(\frac{1}{2n_a A_r} + \frac{16}{3\pi^2 A_c} \right)$ n_k – число скоплений контактов	Учитывается наличие кластеров [2]
4	Упругий, пластиче-ский(с учетом класте-ров)	$R = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{nA_r} + \frac{32}{3\pi^2 n_k A_c} + \frac{32}{3\pi^2 r_k} \right)$ r_k – радиус номинальной площади контак-та	Учитывается взаимо-действие кластеров [2]
5	Упругий	$R_c = 0,589\rho \left(\frac{E'}{PR_1} \right)^{\frac{1}{3}}$	
6	Пластический	$R_c = 0,899\rho \left(\frac{HB}{P} \right)^{\frac{1}{2}}$	
7	Упругий, пластиче-ский	$R_c = \frac{Xq_r}{P}$ q_r – фактическое давление; X – переходное сопротивление единицы площади контакта	
8	Упругий, пластиче-ский	$R_c = \frac{\pi}{10} S_m \rho \frac{H_0}{\beta P} + \frac{\rho}{\sqrt{n_k A_c}}$	Автор: В.В. Измайлов
9	Упругий, пластиче-ский	$R_c = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\pi \sigma_{CH}}{hP} \right)^{\frac{1}{2}}$	
10	Упругий, пластиче-ский	Теория на базе модели случайного поля распределения микрорельефа	Авторы: А.И. Свириденко, С.А. Чижик, М.И. Петроковец [2]

– для пластического взаимодействия относительная площадь контакта:

$$\frac{A_{r\text{ пласт}}}{A_c} = \frac{N}{A_c C \sigma_s} = \frac{q_s}{C \sigma_s} = \frac{q_s}{HB} \quad (8)$$

где q_s – удельная нагрузка в контуре трибосопряжения.

В процессе работы трибосопряжения в зависимости от режима трения (граничное тре-ние, полужидкостное трение) возможны как упругие, так и пластические деформации контак-тов. Предполагаем, что большинство контактов в трибосопряжении будут иметь совмещенную упругопластическую деформацию, тогда относительная площадь определяется как [3]:

$$\frac{A_{r\text{ упр-пласт}}}{A_c} = \delta + \frac{\frac{1}{b^v v} Y_k}{2} \delta^{(v-1)/v} \quad (9)$$

где δ – отношение контурного давления к давлению, переводящему микронеровность в пла-стическое состояние;

Y_k – отношение критического сближения к максимальной высоте неровностей

$$Y_k = \frac{a_k}{h_{\max}}, \quad (10)$$

Очевидно, что действие РВС и модификаторов приводит к изменению h_{\max} , следовательно, посредством изменения Y_k в процессе получения изоморфного металлокерамического слоя во впадинах микронеровностей будет меняться и соотношение фактической площади контакта к контурной площади (A_r / A_c) для упругопластического взаимодействия. С учетом вышеизложенной теории это приводит к изменению сопротивления стягивания в контакте трибосопряжения.

Рассмотренные теоретические зависимости позволяют построить обобщенную диагностическую модель трибосопряжения, представленную на рисунке 4.

Как видно, РВС или модификатор может непосредственно воздействовать на свойства материалов деталей трибосопряжения (модификация поверхностного слоя) и на характеристики микрорельефа контактирующих поверхностей. Также возможны изменения в свойствах смазочного материала, если после обработки РВС он не меняется в узле.

Указанные факторы влияют на номинальную, контурную и фактическую площадь контакта, на давление в контакте и сближение поверхностей (условно – на макропараметры трибосопряжения). Под воздействием этих изменений происходит формирование микропараметров контактирования (сближение микронеровностей, число микроконтактов и их кластеров и т.п.).

Под воздействием микропараметров формируется сигнал электрического сопротивления, который можно получить с трибосопряжения. Таким образом, диагностический сигнал электрического сопротивления, полученный в процессе работы трибосопряжения и представляемый в виде временной функции $R(t)$ будет нести в себе диагностическую информацию о действии РВС в зоне трения трибосопряжений. Оценивая параметры функции $R(t)$, можно выявить и исследовать отдельные процессы, происходящие в зоне трения в ходе действия РВС и модификаторов.

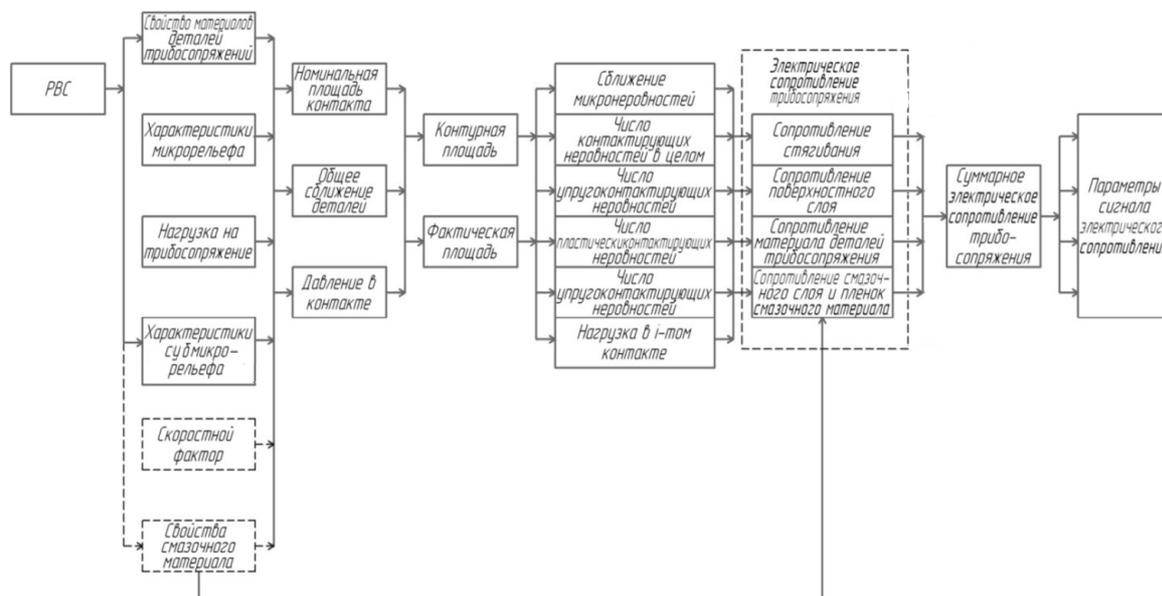


Рисунок 4 – Обобщенная диагностическая модель трибосопряжения

ВЫВОД

Действие РВС и модификаторов поверхностей трения [5-7], в первом приближении, можно трактовать как изменение фактической площади контактов микронеровностей трибосопряжения с последующим изменением сопротивления стягивания. При измерении электрического сопротивления трибосопряжения производится косвенная оценка действия РВС и модификаторов при работе трибосопряжения. Более глубокий анализ действия РВС и модификаторов на уровне образования субмикроструктур в поверхностном слое с помощью вышеизложенной теории провести затруднительно, т.к. необходимо учесть большее количество

факторов, действующих на микро-, субмикро- и нано уровнях на проводимость (сопротивление) поверхностного слоя поверхностей трения, что выходит за рамки данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Польшер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, А. Майснер // Под ред. М.Н. Добычина – М.:Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Свириденко, А.И. Механика дискретного фрикционного контакта / А.И. Свириденко, С.А. Чижик, М.И. Петроковец. – Мн.: Навукаітэхніка, 1990.-272 с.
3. Демкин, Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н.Б. Демкин. – Москва: издательство АН СССР, 1962. – 110 с.
4. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966.-194 с.
5. <http://reagent-2000.ru/articles/1/> [электронный ресурс]
6. <http://reagent2000.ru/action.html> [электронный ресурс]
7. <http://mageric.front.ru/rvc.htm> [электронный ресурс]

Мишин Владислав Владимирович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-67-33

E-mail: vlad89290@gmail.com

Молодцов Евгений Николаевич

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

инженер.

(4862)-41-67-33

V.V. MISHIN, E.N. MOLODTSOV

TO A QUESTION OF THE ESTIMATION ACTION RRS AND MODIFIERS OF A FRICTION SURFACES ON PARAMETRES OF A ELECTRIC RESISTANCE

In a paper scientific substantiation of possibility of diagnosing of friction place is presented at their processing by repair-regenerative structures. Short classification RRS is presented. The analysis of components of electric resistance friction place in the presence of blanket updatings is carried out. It is confirmed that action RRS can be treated as change of the actual area of contacts of micro-roughness in friction place with the subsequent change of resistance of tightening. At measurement of electric resistance the friction place the indirect estimation of action RRS at work.

Key words: friction place, resistance of contact, repair-regenerative structures.

BIBLIOGRAPHY

1. Pol'cer, G. Osnovy trenija i iznashivanija / G. Pol'cer, A. Majsner // Pod red. M.N. Dobychina – М.:Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Sviridenok, A.I. Mehanika diskretnogo frikcionnogo kontakta / A.I. Sviridenok, S.A. Chizhik, M.I. Petrokovec. – Мн.: Navukaitjehnika, 1990.-272 s.
3. Demkin, N.B. Fakticheskaja plowad' kasanija tverdyh poverhnostej / N.B. Demkin. – Moskva: izda-tel'stvo AN SSSR, 1962. – 110 s.
4. Ryzhov, Je.V. Kontaktnaja zhestkost' detalej mashin / Je.V. Ryzhov. – М.: Mashinostroenie, 1966.-194 s.
5. <http://reagent-2000.ru/articles/1/> [jelektronnyj resurs]
6. <http://reagent2000.ru/action.html> [jelektronnyj resurs]
7. <http://mageric.front.ru/rvc.htm> [jelektronnyj resurs]

Mishin Vladislav Vladimirovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department „Instrument engineering, metrology and certification“

Tel. 4862-41-67-33

e-mail: Vlad89290@gmail.com

Molodtsov Eugeny Nickolaevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Engineer

Tel. 4862-41-67-33

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Показано, что разрабатываемые средства комплексного контроля качества предназначены для функционирования в неблагоприятных условиях. Для количественного сравнения рассмотренных информационных структур и режимов их функционирования в системе комплексного контроля качества введены критерии оценки их создания и эксплуатацию. Получены соотношения, позволяют определить количественные оценки эффекта при контроле и разности участка контроля качества контактирования в распределенных информационно-измерительных системах, при рассмотрении централизованной структуры комплексной системы диагностирования

Ключевые слова: *эффективность, комплексный контроль, качество, распределенные системы, диагностирование, информационные потоки устройство.*

Разрабатываемые средства комплексного контроля качества предназначены для функционирования в неблагоприятных условиях:

- загрязненность внешней среды;
- широкий разброс температурных и климатических параметров;
- большой объем контрольно-диагностических операций и т.п.

Кроме того, эти средства должны быть автоматизированы и объединены в соответствующие системы (СК). Это связано с большими материальными затратами на их создание и эксплуатацию.

Поэтому необходимо всесторонне оценить эффективность вероятных путей и решений построения оптимальных структур средств комплексного контроля с учетом как внешнего взаимодействия с объектами контроля (ОК) и управления процессом контроля, так и его внутренних связей с учетом получения высокой технологичности и эффективности контроля при минимальных материальных затратах.

Режимы функционирования и информационные связи систем комплексного контроля качества, общем виде, представлены на рисунке 1 [1].

При централизованной структуре (рис. 1а) все участки контроля и управления в том числе и комплексный контроль качества связаны непосредственно с централизованной ЭВМ, которая поочередно взаимодействует с каждым из них в соответствии с определенной заранее очередностью, используя специально для него предназначенное математическое обеспечение. При этом неизбежны потери эффективности, связанные с ожиданием обслуживания.

Иерархическая структура распределенной системы предполагает выделение для обслуживания комплексного контроля качества собственных микро-ЭВМ (рис. 1б), а комбинированная система – обслуживание нескольких участков контроля качества с помощью одной микро-ЭВМ со специально разработанным для этого математическим обеспечением (рис. 1в). При этом интенсивность потока требований на обслуживание λ_i и параметр закона обслуживания μ_i , считая время обслуживания распределенным по показательному закону для участков контроля качества разных линий, а также их функции потерь β_i могут в общем случае отличаться [2].

Для количественного сравнения рассмотренных информационных структур и режимов их функционирования в системе комплексного контроля качества введем критерии оценки их создания и эксплуатацию. Это возможно осуществить с помощью методов анализа стохастических процессов, протекающих в замкнутом контуре: «объект контроля (ОК) – средства контроля качества (СК) – информационно управляющая система (ИУС)»

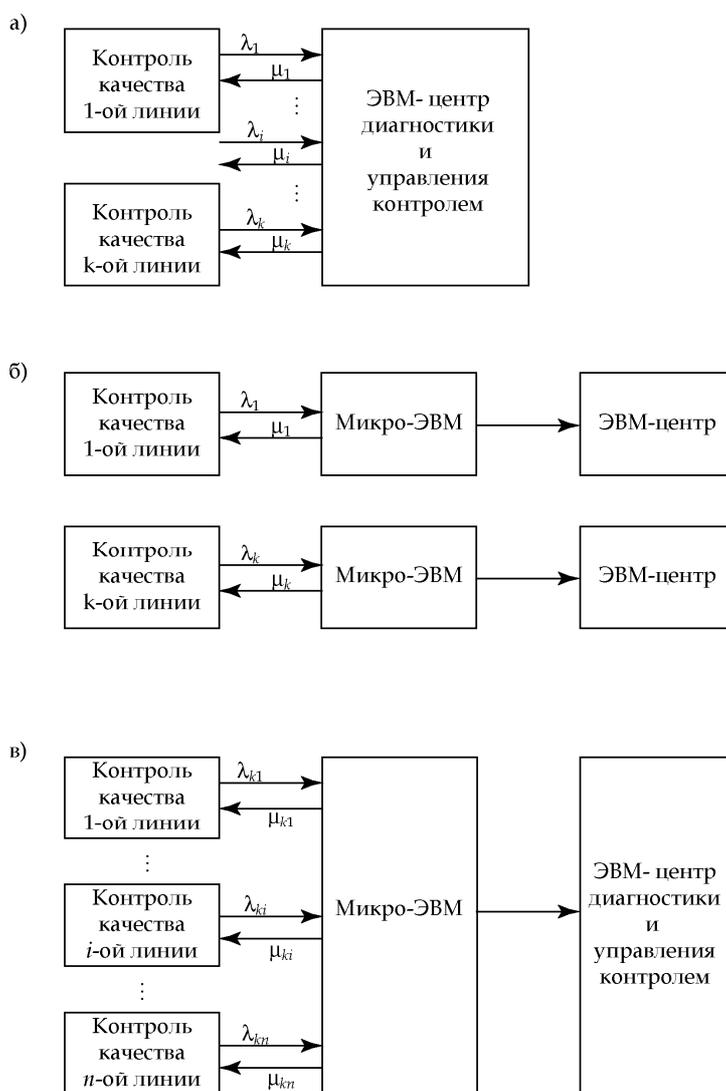


Рисунок 1 – Режимы функционирования системы контроля качества и информационные потоки при различных структурах
 а) централизованной; б) распределенной; в) комбинированной

В качестве критерия эффективности процесса контроля и управления целесообразно использовать критерий приведенных затрат, который в общем случае принимает вид [3]:

$$W = W_{\Sigma} + E_n C + (B - B_p), \quad (1)$$

- где C – единовременные капитальные затраты;
 W_{Σ} – эксплуатационные затраты в единицу времени;
 E_n – нормальный коэффициент эффективности;
 B – максимальный эффект от внедрения «идеальной» ИУС;
 B_p – эффект от внедрения конкретного варианта ИУС.

При сравнительном анализе ИУС достаточно рассмотрения разности:

$$\Delta = B_p - C_{\Sigma}, \quad (2)$$

где $C_{\Sigma} = CE_n + W_{\Sigma}$ – максимум соотношения (2) определит оптимальный вариант управляющей системы.

На основании этого критерия оценки эффективности комплексного контроля качества выбраны контролируемые параметры, в соответствии с требованиями ГОСТов к их измерению, а также обоснован выбор альтернативных вариантов структуры и режимов функционирования устройства комплексного неразрушающего контроля. При этом необходимо учесть

весь комплекс процессов, протекающих в контуре управления, принять во внимание весь спектр временных, надежностных, метрологических, стоимостных параметров элементов этого контура.

Правильное решение этой задачи предопределяет успех всего процесса создания и внедрения комплексной системы качества (КСК), поскольку именно на этом этапе формируется система и ее состав.

Для оптимального проектирования средств комплексного контроля необходимо на этапе их предварительной разработки всесторонне оценить эффективность вероятных решений. Для этого следует провести анализ процессов взаимодействия объекта контроля (ОК) с комплексными средствами контроля и управления математической основой такого анализа является теория случайных процессов [2].

Выделим два типа существующих информационных потоков по входу и выходу КСК. Поток (или посылкой) первого типа является запрос, второго – его обработка или воздействие. ОК и КСК взаимодействуют по схеме: «запрос-воздействие». Назначение КСК – трансформация посылки первого в посылку второго типа. Таким образом, КСК обрабатывает в соответствии с некоторым законом функционирования F поток входной информации X , образуя на выходе случайную последовательность Y реализуя тем самым следующее отображение:

$$F: X \rightarrow Y. \quad (3)$$

Однако, на работу КСК оказывает воздействие ряд возмущающих факторов Z , поэтому реальным законом функционирования является отображение вида:

$$F: X \times Z \rightarrow Y. \quad (4)$$

Качество взаимодействия можно оценить с помощью введенного критерия приведенных затрат. В общем случае алгоритм функционирования F можно представить в виде совокупности более простых алгоритмов, т.е.

$$F = f(F_1, F_2, \dots, F_n),$$

выполнение каждого из которых поручено одному из элементов КСК.

Тогда качество контроля и его управления определяются алгоритмом: $F = f(F_1, F_2, \dots, F_n)$, а также надежностью, быстродействием, метрологическими параметрами элементов и устройств контроля, реализующих частичные операторы:

$$B_p = L(F_i, R_i, q_i, \tau_i), \quad [i = \overline{1, N}], \quad (5)$$

где R_i – вероятность исправного состояния i -ого элемента линии или i -ой линии связи в целом;

τ_i – время пребывания запроса в i -ой линии.

Поскольку оператор F в (4) носит случайный характер, соотношение (5) следует усреднить и перейти к математическим ожиданиям:

$$M \Delta = MB_p - CE_n - W_3. \quad (6)$$

Качество взаимодействия можно оценить, задав функции потерь информации в контролируемом объекте в его различных состояниях $G_j(t)$ и отыскав плотности вероятностей времени его пребывания в них $\chi_1(t_1)$ через математическое ожидание

$$MB_p = \sum_{i=1}^n P_i \int_0^{\infty} G_i(t) \chi_i(t) dt. \quad (7)$$

Если $G_j(t)$ являются линейными функциями, то задача существенно упрощается и сводится к отысканию первых моментов времени пребывания ОК в различных состояниях.

Примем следующую модель: средства контроля (СК) и независимые ОК взаимодействуют на временном интервале, где каждый i -ый ОК $[i = \overline{1, N}]$ определен линейной функцией эффективности.

Анализ информационного процесса показал, что комплексный неразрушающий контроль качества связан с реализацией всех этапов информационного процесса, так и семантического, а на выходе – выходной документ о качестве контролируемого объекта, кроме того необходимо выполнять сервисные операции по перемещению ОК и датчиков, коммутации и опроса датчиков для контроля измерительного процесса, обработки результатов измерения, управления и т. д.

В связи с этим в состав средств комплексного неразрушающего контроля качества должна входить информационная и вычислительная техника с широкими возможностями. При этом возникает множество вероятных вариантов реализации КСК и выбора тех или иных алгоритмов управления и технических средств, например, использовать микропроцессорную технику или микро-ЭВМ применять локальные регуляторы, организовывать всю систему управления с помощью одной большой ЭВМ или распределить функции управления между несколькими мини-ЭВМ и т.д. В последнем случае возникает, в частности, вопрос оптимального распределения функций между элементами КСК. При решении этих задач, прежде всего, необходимо оценить эффективность различных вариантов принятых решений.

Пусть комплексная система контроля (КСК) взаимодействует с каким-то i -ым объектом контроля (ОК). Анализ эффективности функционирования исследуемого комплекса требует совместного рассмотрения вероятных исходов $(j-1)$ -го взаимодействия КСК и ОК с поведением ОК на j -ом интервале. С этой целью на множестве указанных исходов выделим два события:

Первое – его вероятность P_1 , состоит в том, что по окончании $(j-1)$ -го интервала взаимодействия ОК способен функционировать на j -ом интервале.

Второе – его вероятность $P_2=1-P_1$, такая способность отсутствует.

Применительно к технологии контроля сложной распределенной системы или радиоэлектронного устройства это следует понимать следующим образом, если по окончании $(j-1)$ -го интервала ОК находится в состоянии готовности к выполнению своих функций, то имеет место 1-ое событие.

Состояние ОК, когда контролируемое изделие нуждается во вмешательстве КСК для выполнения своих функций, или неисправно соответствует 2-му событию.

Например, контроль за всеми возможными отказами телекоммуникаций или радиоэлектронного изделия (ОК) осуществляется с помощью одной комплексной системы контроля (КСК). С момента поступления на участок контроля качества соединений для прохождения этого вида контроля изделия при переходе из состояния 1 в состояние 2, так как ОК не находится в состоянии готовности к выполнению своих функций и нуждается во взаимодействии с КСК. Закончив взаимодействие по определенной последовательности с другими элементами ОК КСК подключается к участку контроля качества соединений и, обеспечив его работу по контролю изделия, переводит тем самым его снова в состояние 1.

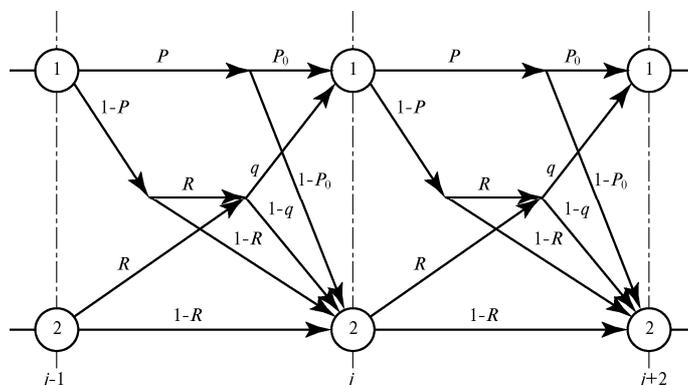


Рисунок 2 – Диаграмма вероятных состояний объекта контроля

На рисунке 2 приведена диаграмма эволюции ОК. Вершинам диаграммы соответствуют определенные выше события: первое (1) и второе (2), другим – возможные отказы

и неисправности, над которыми проставлены их вероятности. Вертикалям $1, 2, 3, \dots, j-1, j, j+1, \dots$ соответствуют моменты времени завершения взаимодействий КСК и ОК. Эта диаграмма позволяет определить вероятности нахождения i -го ОК, в нашем случае технологического контроля отказов, в состоянии 1 или 2 с учетом его собственных реальных характеристик: R_i, q_i, τ_i , а также характеристик всех остальных технологических параметров системы контроля при диагностике и ремонте ОК.

Величины P и P_0 – вероятности отсутствия появления запроса ОК за время T и τ определяются по формулам:

$$P = \int_0^{\infty} e^{-\lambda T} \theta'(T) dT, \quad P_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \tau} \Phi'(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где $\theta'(T), \Phi'(\tau)$ – плотности вероятности случайных величин T и τ .

Заметим, что моменты завершения взаимодействий являются точками регенерации случайного процесса функционирования исследуемой модели «объект контроля – комплексная система контроля» (ОК–КСК).

С учетом этой диаграммы можно указать вероятность $P(d/l)$ того, что в j -ый момент регенерации объект окажется в состоянии d , если до этого он был в состоянии l , и тем самым определить марковский процесс с матрицей переходных вероятностей:

$$P(d/l) = \begin{pmatrix} P(1/1) & P(1/2) \\ P(2/1) & P(2/2) \end{pmatrix},$$

где $P(1/1) = P_0 + Rq(1 - P)$, $P(1/2) = 1 - P(1/1)$, $P(2/1) = Rq$, $P(2/2) = 1 - P(2/1)$.

Введем такие величины вероятностей событий: $P_k(1); P_k(2); P_{k+1}(1)$ и $P_{k+1}(2)$, которые определяют вероятности пребывания ОК после k -го и $(k+1)$ -го взаимодействия с КСК в состояниях 1 или 2.

Соответственно рекуррентная система соотношений, связывающая указанные выше вероятности примет вид:

$$\begin{cases} P_{k+1}(1) = P_k(1) \cdot P(1/1) + P_k(2) \cdot P(1/2) \\ P_{k+1}(2) = P_k(1) \cdot P(1/2) + P_k(2) \cdot P(2/2) \end{cases}. \quad (9)$$

Существование стационарного режима очевидно. Пусть теперь $P_1 = \lim_{k \rightarrow \infty} P_k(1)$, а $P_2 = \lim_{k \rightarrow \infty} P_k(2)$. Подставим соотношения $P_k(1) = P_{k+1}(1)$ и $P_k(2) = P_{k+1}(2)$ в систему уравнений (9), устремив к бесконечности, и решим её относительно P_1 и P_2 . Решение будет иметь вид:

$$P_1 = \frac{Rg}{1 - P(P_0 - Rg)}, \quad P_2 = 1 - P_1. \quad (10)$$

Перейдем к определению значения величины эффекта от взаимодействия ОК с КСК. С этой целью определим случайную величину B_j – эффект от операции с ОК на j -ом интервале.

Очевидно, что B_j равно нулю при условии, что в точке $(j-1)$ -го взаимодействия имело место событие 2.

Определение величины B_j , если на $(j-1)$ -ом интервале имело место событие 1, требует предварительной записи плотности вероятности $\chi(t)$ величины t – отрезка времени от начала j -го интервала до появления запроса на управление контролем. При фиксированных T и τ

$$\chi(t) = \lambda e^{-\lambda t} + \delta(t - T - \tau) e^{-\lambda(T+\tau)}, \quad 0 \leq t \leq (T + \tau), \quad (11)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция.

Поскольку B_j является случайной величиной, определим ее математическое ожидание (MB_j):

$$MB_j = P_1 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{T+\tau} b \cdot t (\lambda e^{-\lambda t} + \delta(t-T-\tau) e^{-\lambda(T+t)}) \cdot \theta'(T) \cdot \Phi'(\tau) \cdot dT \cdot d\tau \cdot dt.$$

С учетом свойства дельта - функции:

$$\int_0^{\infty} \varphi(T) \delta(t-T^*) dT = \varphi(T^*) \quad (12)$$

$$MB_j = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{b}{\lambda} (1 - e^{-\lambda(T+\tau)}) \cdot \theta'(T) \cdot \Phi'(\tau) \cdot dT \cdot d\tau = \frac{b}{\lambda} (1 - PP_0) \cdot P_1. \quad (13)$$

Окончательно получим:

$$MB_j = \frac{bRq(1 - PP_0)}{\lambda(1 - P(P_0 - Rq))}. \quad (14)$$

В свою очередь средняя величина разности эффекта и затрат на один интервал управления контролем определяется соотношением

$$M\Delta j = MB_j - MH(\tau), \quad (15)$$

где $MH(\tau)$ – математическое ожидание сходимости взаимодействия КСК и ОК.

Предположим, что КСК необходимо управлять в течении времени $T_0 > (T + \tau)$.

В этом случае:

$$T_0 = \sum_{j=1}^n T_j + \sum_{j=1}^n \tau_j, \quad (16)$$

где n – количество интервалов взаимодействия.

Усредняем левую и правую части последнего соотношения, тогда получим:

$$T_0 = n(MT + M\tau). \quad (17)$$

В свою очередь эффект от управления на “ n ” интервалах B_n складывается от эффекта, полученного на каждом из них. Тогда $B_n = \sum_{j=1}^n B_j$.

Аналогично выполнив усреднения последнего соотношения, запишем $MB_n = n \cdot MB_j$, следовательно

$$M\Delta n = \frac{T_0 MH(\tau)}{MT + M\tau} \left(\frac{MB_j}{MH(\tau)} - 1 \right). \quad (18)$$

С целью определения оптимального с точки зрения выбранного критерия закона управления контролем $\theta(T)$ подтвердим закономерность, что максимуму, если он существует, функционала (18) при граничных условиях $\theta(0) = 0$, $\theta(\infty) = 1$ соответствует функция:

$$\theta(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T^* \\ 1, & T > T^* \end{cases}. \quad (19)$$

Условие существования максимума функционала (18) определяется неравенством:

$$bRq / \lambda MH(\tau) > 1. \quad (20)$$

Для доказательства этого функционал (18) представим в виде:

$$J = \frac{J_1 - J_2}{J_2 \cdot J_3}, \quad (21)$$

где $J_1 = \frac{bRq}{\lambda MH(\tau)} (1 - PP_0)$, $J_2 = 1 + P(Rq - P_0)$, $J_3 = MT + M\tau$.

Его первая вариация равна:

$$\delta J = \frac{J_2 J_3 (\delta J_1 - J_2) - (J_1 - J_2) (J_2 \delta J_3 + J_3 \delta J_2)}{(J_2 J_3)^2}. \quad (22)$$

Пусть $\theta(T) = 0$ соответствует экстремум функционала (21), тогда, используя условие $\delta J = 0$ ($J_2 \neq 0, J_3 \neq 0$), из (9) получим

$$\delta_1 J_1 + \mu_1 \delta J_2 - \mu_3 \delta J_3 = 0 \quad (23)$$

где $\mu_1 = \frac{J_2(\theta_3)}{J_3(\theta_3)}$, $\mu_2 = \frac{J_1(\theta_3)}{J_2(\theta_3)}$, $\mu_3 = \frac{J_1(\theta_3)}{J_3(\theta_3)}$.

Следовательно, функция, достигающая экстремум функционала (19), должна удовлетворять уравнению Эйлера для промежуточного функционала:

$$J^* = J_1 + \mu_1 J_3 - \mu_2 J_2 - \mu_3 J_3. \quad (24)$$

Последний относится к классу функционалов вида:

$$\int_0^{\infty} [X(T) + \theta'(T)Y(T)] dT, \quad (25)$$

для которых дифференциальное уравнение Эйлера обращается в алгебраическое вида:

$$Y(T) = 0, \quad (26)$$

а оптимальное уравнение достигается в классе функций с вертикальными участками.

Поскольку соотношение (24) в данном случае не обращается в тождество, то, принимая во внимание граничные условия, запишем в качестве экстремума функцию (19).

Значение T можно получить из уравнения (24), однако, проще определить его из условия максимума величины $M\Delta n$ предварительно подставив (20) в (21). Получим

$$M\Delta n = \frac{F(T, \tau)}{(T + \tau)T_0 MH(\tau)}, \quad (27)$$

где $F(T, \tau) = \frac{bRq}{\lambda MH(\tau)} \frac{1 - e^{-\lambda(T+\tau)}}{1 + e^{-\lambda(T+\tau)}} (Rq - e^{-\lambda T}) - 1$.

Функция $F(T, \tau)$ является строго монотонной и обладает горизонтальной асимптотой, соответствующего значению:

$$F(T, \tau) = F^* = \frac{bRq}{\lambda MH(\tau)} - 1, \quad (28)$$

Следовательно, условием существования максимума величины является неравенство (20).

Полученные соотношения (27) и (28) позволяют определить количественные оценки эффекта при контроле и разности этого эффекта и приведенных затрат любого комплексного средства контроля, в частности, участка контроля качества контактирования в распределенных информационно-измерительных системах, при рассмотрении централизованной структуры комплексной системы диагностирования, а соотношение (18) определяет наиболее эффективный режим работы КСК с параметрами, которые определяются на основании конкретных характеристик используемого КСК и всех ОК из соотношения (27).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Засецкий, А.В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи / А.В. Засецкий, А.Б. Иванов, С.Д. Постников, И.В. Соколов. Часть II, под ред. Иванова А. Б. – М.: Сайрус Системс, 2001. – 336 с.
2. Васильев, А.М. Современные распределенные информационно-измерительные системы. Методология построения / А.М. Васильев. Книга 1. – М.: МГУПИ, 2008. – 235 с.
3. Васильев, А.М. Современные распределенные информационно-измерительные системы. Методология построения / А.М. Васильев. Книга 2. – М.: МГУПИ, 2009. – 258 с.
4. Васильев А.М. Комплексный контроль и диагностика оборудования телекоммуникационных сетей / А.М. Васильев. – М.: МГУПИ, 2010. – 165 с.

Васильев Андрей Михайлович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Докторант

Тел. (499) 2687694

E-mail: garvad@mail.ru

A.M. VASILYEV

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE COMPLEX QUALITY ASSURANCE IN THE DISTRIBUTED INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

It is shown that developed means of complex quality assurance are intended for functioning in adverse conditions. For quantitative comparison of the considered information structures and modes of their functioning in system of complex quality assurance are entered criteria of an estimation of their creation and operation. Parities are received, allow to define quantitative estimations of effect at control and a difference of this effect and the resulted expenses of any complex control device, in particular, a quality assurance site контактирования in the distributed information-measuring systems, by consideration of the centralized structure of complex system of diagnosing.

Key words: efficiency, complex control, the quality, the distributed systems, diagnosing, information streams the device.

BIBLIOGRAPHY

1. Zaseckij, A.V. Kontrol' kachestva v telekommunikacijah i svjazi / A.V. Zaseckij, A.B. Ivanov, S.D. Postnikov, I.V. Sokolov. Chast' II, pod red. Ivanova A. B. – M.: Sajrus Sistems, 2001. – 336 s.
2. Vasil'ev, A.M. Sovremennye raspredelemnje informacionno-izmeritel'nye sistemy. Metodologija postroenija / A.M. Vasil'ev. Kniga 1. – M.: MGUPI, 2008. – 235 s.
3. Vasil'ev, A.M. Sovremennye raspredelemnje informacionno- izmeritel'nye sistemy. Metodologija postroenija / A.M. Vasil'ev Kniga 2. – M.: MGUPI, 2009. – 258 s.
4. Vasil'ev A.M. Kompleksnyj kontrol' i diagnostika oborudovanija telekommunikacionnyh setej / A.M. Vasil'ev. – M.: MGUPI, 2010. – 165 s.

Vasilyev Andrey Michailovich

Moscow state university of instrument engineering and informatics, Moscow

Ph.D candidate

Tel. 499-2687694

e-mail: garvad@mail.ru

Уважаемые авторы!

Просим Вас ознакомиться с основными требованиями к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ - 1,25 см, правое поле - 2 см, левое поле - 2 см, поля внизу иверху - 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки - РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала - должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** - описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем - 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** - это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.ostu.ru.

Адрес учредителя

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.ostu.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 21.03.2011 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 11.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.