

ISSN 1998-6629

# ВЕСТНИК

САМАРСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национального исследовательского  
университета)

№ 1 (32)

2012

ВЕСТНИК  
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национального исследовательского университета)

№ 1 (32)

2012

*Главный редактор*

Шахматов Е. В., д.т.н., профессор

*Заместители главного редактора*

Балакин В. Л., д.т.н., профессор, Прокофьев А. Б., д.т.н., профессор

*Ответственный секретарь*

Прохоров А. Г., к.т.н., доцент

*Редакционная коллегия*

Астафьев В. И., д.ф.-м.н., профессор	Кузьмичёв В. С., д.т.н., профессор
Балакин В. Л., д.т.н., профессор	Лукачёв С. В., д.т.н., профессор
Богатырёв В. Д., д.э.н., профессор	Меркулова Л. П., д.п.н., профессор
Казанский Н. Л., д.ф.-м.н., профессор	Михеев В. А., д.т.н., профессор
Комаров В. А., д.т.н., профессор	Пиганов М. Н., д.т.н., профессор
Коптев А. Н., д.т.н., профессор	Прохоров С. А., д.т.н., профессор
	Фалалеев С. В., д.т.н., профессор

*Председатель редакционного совета*

Сойфер В. А., член-корр. РАН

*Редакционный совет*

Аншаков Г. П., член-корр. РАН	Гречников Ф. В., член-корр. РАН
Барвинок В. А., член-корр. РАН	Кирилин А. Н., д.т.н., профессор
	Шорин В. П., академик РАН

Журнал входит в утверждённый ВАК Минобрнауки РФ Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук  
Журнал включён в общероссийский каталог ОАО "Роспечать". Подписной индекс - 18264

© Самарский государственный аэрокосмический университет  
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Тел.: (846) 267 48 41; электронная почта: [vest@ssau.ru](mailto:vest@ssau.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

---

<b>КОМАНДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО МАРШЕВОГО САМОЛЁТА ПРИ НАБОРЕ ВЫСОТЫ</b> <i>В. Л. Балакин, А. Г. Кочян</i>	9
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</b> <i>А. В. Болдырев, В. А. Комаров</i>	15
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЦИКЛЕ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ</b> <i>В. Н. Гришанов, А. А. Ойнонен</i>	24
<b>АППРОКСИМАТИВНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО–СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ</b> <i>С. А. Прохоров, С. А. Ильинский, Т. Г. Александрова, Я. В. Соловьева</i>	36
<b>РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И НАВЕДЕНИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ</b> <i>В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, С. Г. Сафронов</i>	47
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ</b> <i>Н. В. Чекрыжев, А. Н. Коптев</i>	55
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА</b>	
<b>МОДЕЛЬ ОСНОВНОГО ЧЕРВЯКА ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС</b> <i>С. П. Андросов, И. Г. Браилов, Д. В. Визигин</i>	63
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЕРИОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД</b> <i>И. Х. Бадамшин</i>	71
<b>СТЕСНЁННЫЙ ИЗГИБ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ КРИВОЛИНЕЙНЫХ БОРТОВ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ</b> <i>В. А. Барвинок, А. Д. Комаров, В. Г. Кулаков, В. К. Мусеев, А. А. Шаров</i>	77

<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ МАНОМЕТРОВ</b> <i>А. Г. Гимадиев, А. А. Гимадиев, А. З. Ермошкин, В. Н. Илюхин</i>	86
<b>РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕКСТУРИРОВАННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ЗАГОТОВОК</b> <i>Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов</i>	94
<b>УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЕСТКОГО НЕСИММЕТРИЧНОГО РОТОРА В УПРУГО-ДЕМПФЕРНЫХ ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ</b> <i>Ю. И. Ермилов</i>	100
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАПМОВКИ ПОЛИУРЕТАНОМ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ СТЕСНЁННОГО ИЗГИБА</b> <i>Е. В. Еськина, Е. Г. Громова</i>	111
<b>АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ КРУГЛЫХ ИЗДЕЛИЙ</b> <i>В. Р. Каргин, Б. В. Каргин, С. Ю. Колесникова, Ю. А. Сергеев</i>	118
<b>РАСЧЁТ СКОЛЬЖЕНИЯ В МЕЖВАЛЬНЫХ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКАХ ГТД</b> <i>В. В. Макарчук, Е. П. Жильников</i>	125
<b>МЕТОДИКИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБОПРОВОДОВ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ</b> <i>Т. Б. Миронова, А. Б. Прокофьев, В. П. Шорин</i>	135
<b>ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА</b> <i>В. Н. Николаев</i>	143
<b>ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН ИЗ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> <i>Ю. С. Первушин, П. В. Соловьёв</i>	153
<b>СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ШТАМPE С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ</b> <i>И. П. Попов, Е. С. Нестеренко, М. В. Зимарев</i>	161
<b>СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ ВЫРУБКИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК</b> <i>Е. Н. Почекуев, А. В. Скрипачев, П. Н. Шенбергер</i>	170
<b>ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ</b> <i>О. В. Ромашкина, О. В. Каранаева</i>	178

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*О. Г. Савельева*

183

---

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

**ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ МИКРОАКСИКОНА**

*С. А. Дегтярев, С. Н. Хонина*

196

---

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

**ВЫЧИСЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ В КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ МАЛОМ МНОГОЗНАЧНОМ ВОЗМУЩЕНИИ**

*А. Н. Лепилов*

207

**КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ ЗВЕНЬЕВ АВИАТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ В РАМКАХ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ МАКРОЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*А. А. Пахомов*

211

**ВИЗУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЕРИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*А. А. Тюгашев, А. Ю. Богатов, А. В. Шульдин*

219

---

**ЭКОНОМИКА И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**

**ПОВЫШЕНИЕ РОЛИ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ НА ОБЪЕКТАХ, ПОДКОНТРОЛЬНЫХ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЕ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ**

*В. А. Барвинок, Л. А. Наумов, А. В. Долгих*

226

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ТОВАРООБОРОТА РОЗНИЧНОГО ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

*А. У. Ибрагимов, Л. А. Ибрагимова, Г. И. Гильмуллина*

233

**ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ**

*А. У. Ибрагимов, Л. А. Ибрагимова, М. В. Караваева*

242

**СИСТЕМА МНОГОУРОВНЕВОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ**

*В. И. Столбов*

250

## CONTENTS

---

---

### AVIATION AND ROCKET-SPACE ENGINEERING

---

<b>COMMAND CONTROL OF HYPERSONIC CRUISING AIRCRAFT DURING CLIMB</b>	
<i>V. L. Balakin, A. G. Kotchyan</i>	9
<b>HIGH FIDELITY MODELING AT EARLY STAGES OF AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN</b>	
<i>A. V. Boldyrev, V. A. Komarov</i>	15
<b>UP-TO-DATE LASER MEASURING SYSTEMS IN THE PRODUCTION CYCLE OF SPACE TECHNIQUE</b>	
<i>V. N. Grishanov, A. A. Oynonen</i>	24
<b>APPROXIMATE CORRELATIVE-SPECTRAL ANALYSIS OF TEMPERATURE PATTERNS OF COMBUSTION CHAMBERS</b>	
<i>S. A. Prokhorov, S. A. Ilinsky, T. G. Aleksandrova, Ya. V. Solovyova</i>	36
<b>SOLVING TASKS OF CONTROL AND TARGETING FOR REMOTE SENSING DEVICES BY SYSTEMS OF PROCESSING AND ANALYSIS OF VISUAL INFORMATION</b>	
<i>V. V. Sbrodov, V. P. Sviridov, S. G. Safronov</i>	47
<b>PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF METHODS OF MAINTENANCE OF COMPLEX SYSTEMS OF AIRBORNE EQUIPMENT COMPLEX</b>	
<i>N. V. Chekrizhev, A. N. Koptev</i>	55
<hr/> <b>MECHANICAL AND POWER ENGINEERING SCIENCES</b> <hr/>	
<b>MODEL OF THE MAIN WORM OF MILLING CUTTERS FOR GEAR CUTTING</b>	
<i>S. P. Androsov, I. G. Brailov, D. V. Vizigin</i>	63
<b>THEORETICAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON LATTICE SPACING OF AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINE TURBINE MONOCRYSTALS</b>	
<i>I. Kh. Badamshin</i>	71
<b>CRAMPED BENDING OF SHEET METAL PIECE CURVED SIDES WITH AN ELASTIC MEDIUM</b>	
<i>V. A. Barvinok, A. D. Komarov, V. G. Kulakov, V. K. Moissejev, A. A. Sharov</i>	77
<b>DESIGN AND RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A PRESSURE FLUCTUATION DAMPING DEVICE FOR ELECTROCONTACT MANOMETERS</b>	
<i>A. G. Gimadiev, A. A. Gimadiev, A. Z. Ermochkin, V. N. Ilyuchin</i>	86

<b>DEVELOPMENT OF YIELD CRITERIA FOR THE CALCULATION OF FORMING HIGH-TEXTURED ANISOTROPIC BLANKS</b>	
<i>F. V. Grechnikov, Ya. A. Yerisov</i>	94
<b>STABILITY OF A RIGID NONSYMMETRIC ROTOR IN ELASTIC-DAMPER SLIDING BEARINGS</b>	
<i>Yu. I. Ermilov</i>	100
<b>RESEARCH OF THE PROCESS OF SHEET PRESSWORK USING POLYURETHANE UNDER CONSTRAINED BENDING</b>	
<i>E. V. Eskina, E. G. Gromova</i>	111
<b>ANALYSIS OF CONTACT STRESSES IN DRAWING ROUND PRODUCTS</b>	
<i>V. R. Kargin, B. V. Kargin, S. Y. Kolesnikova, Y. A. Sergeev</i>	118
<b>CALCULATION OF SKIDDING IN INTERSHAFT ROLLER BEARINGS OF GAS TURBINE ENGINES</b>	
<i>V. V. Makarchuk, E. P. Zhilnikov</i>	125
<b>FINITE ELEMENT TECHNIQUES FOR PIPE SYSTEM VIBROACOUSTICAL CHARACTERISTICS MODELLING</b>	
<i>T. B. Mironova, A. B. Prokofiev, V. P. Shorin</i>	135
<b>A HOT-WIRE ANEMOMETRIC TRANSDUCER OF AIRFLOW MASS RATE</b>	
<i>V. N. Nikolayev</i>	143
<b>PECULIARITIES OF STRAIN BEHAVIOUR AND STRESSED STATE OF PLATES MADE OF UNBALANCED LAMINATED COMPOSITE MATERIALS</b>	
<i>Y. S. Pervushin, P. V. Soloviev</i>	153
<b>METHOD OF PRODUCING THIN-WALLED CONICAL PARTS IN A DIE WITH AN ELASTIC ELEMENT</b>	
<i>I. P. Popov, E. S. Nesterenko, M. V. Zimarev</i>	161
<b>SYSTEM DESIGN OF FOLLOW SHEARING DIES FOR CUTTING SHEET BLANK</b>	
<i>E. N. Pohekuev, A. V. Skripachev, P. N. Shenberger</i>	170
<b>INFLUENCE OF THE DIRECTION OF ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THREAD PIECES MADE OF TITANIUM ALLOYS</b>	
<i>O. V. Romashkina, O. V. Karanaeva</i>	178
<b>THE INFLUENCE OF THE HEAT PROCESSING AND PLASTIC DEFORMATION MODES ON THE FORMATION OF THE ALUMINUM ALLOYS STRUCTURE</b>	
<i>O. G. Savelyeva</i>	183

**ELECTRONICS, MEASURING DEVICES, RADIO  
ENGINEERING AND COMMUNICATION**

---

**SHARP FOCUSING OF A LINEARLY-POLARIZED VORTICAL BEAM  
BY MEANS OF A MICROAXICON**

*S. A. Degtyaryov, S. N. Khonina*

196

**CONTROL, COMPUTATIONAL EQUIPMENT  
AND INFORMATION SCIENCE**

---

**CALCULATING MAXIMUM AMPLITUDE IN AN OSCILLATORY SYSTEM  
WITH MANY-VALUED PERTURBATION**

*A. N. Lepilov*

207

**CLASSIFICATION OF MODELS OF BASIC LINKS IN THE AIR TRANSPORT  
SECTOR IN THE CONTEXT OF THE PROCESS OF MACROLOGISTIC SYSTEM  
FORMATION AND DEVELOPMENT**

*A. A. Pakhomov*

211

**VISUAL APPROACH TO VERIFICATION OF REAL-TIME CONTROL  
SOFTWARE**

*A. A. Tyugashev, A. Yu. Bogatov, A. V. Shulyndin*

219

**HUMANITIES**

---

**INCREASE OF THE ROLE OF CONFORMITY ASSESSMENT AT THE  
FACILITIES CONTROLLED BY THE FEDERAL SERVICE ON ECOLOGICAL,  
TECHNOLOGICAL AND NUCLEAR SUPERVISION**

*V. A. Barvinok, L. A. Naumov, A. V. Dolgikh*

226

**USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR RETAIL TRADE ENTERPRISE  
GOODS TURNOVER ANALYSIS AND FORECAST**

*A. U. Ibragimov, L. A. Ibragimova, G. I. Gilmullina*

233

**ASSESSMENT OF COMMERCIAL ENTERPRISE PERSONNEL COMPETENCE  
USING FUZZY LOGIC METHOD**

*A. U. Ibragimov, L. A. Ibragimova, M. V. Karavaeva*

242

**THE PROCESS OF CREATING THE SYSTEM OF MULTI-LEVEL CONTINUOUS  
VOCATIONAL TRAINING OF SPECIALISTS**

*V. I. Stolbov*

250



УДК 629.7.07

## КОМАНДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО МАРШЕВОГО САМОЛЁТА ПРИ НАБОРЕ ВЫСОТЫ

© 2012 В. Л. Балакин, А. Г. Кочян

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается задача формирования командного управления гиперзвуковым маршевым самолётом при наборе высоты. Движение исследуется в условиях возмущений плотности атмосферы и отклонений аэродинамических характеристик. Предлагается алгоритм двухканального управления по углу атаки и секунднему расходу топлива. Исследуется эффективность алгоритма по компенсации влияния возмущений на выполнение конечных условий движения.

*Гиперзвуковой маршевый самолёт, возмущённое движение, командное управление, угол атаки, секундный расход топлива.*

**Модель движения.** Рассматривается движение на участке набора высоты гиперзвукового маршевого самолёта (ГМС) с комбинированной силовой установкой (КСУ) в виде пароводородного ракетно-турбинного двигателя [1].

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение ГМС в траекторной системе координат, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= \frac{I(h, M)g b}{m} \cos a - C_{xa}(a, M) \frac{r(h)V^2}{2m} S - \\ &\quad - g \sin q, \\ \dot{q} &= \frac{1}{V} \left( \frac{I(h, M)g b}{m} \sin a + \right. \\ &\quad \left. + C_{ya}(a, M) \frac{r(h)V^2}{2m} S - g \cos q \right) + \frac{V \cos q}{R+h}, \\ \dot{h} &= V \sin q, \\ \dot{b} &= -b. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $V$  – скорость,  $q$  – угол наклона траектории,  $h$  – высота,  $m$  – масса,  $I$  – удельный импульс,  $M$  – число Маха,  $g$  – ускорение свободного падения,  $b$  – секундный расход топлива,  $a$  – угол атаки,  $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$  – соответственно коэффициенты силы ло-

бового сопротивления и аэродинамической подъёмной силы,  $r$  – плотность атмосферы,  $S$  – площадь крыла,  $R$  – радиус Земли.

Аэродинамические характеристики  $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$  и высотно-скоростная характеристика КСУ  $I(h, M)$  приняты согласно [1]. Секундный расход топлива принимается постоянным и равным максимальному ( $b_{\max} = 76$  кг/с).

При невозмущённом движении плотность атмосферы вычисляется по закону, который соответствует стандартной атмосфере для высот от 0 до 40000 м [2]:

$$r = r_0 \exp\left(-\frac{h}{H_1(h)}\right), \quad (2)$$

$$H_1(h) = H_{10} + H_{11}h + H_{12}h^2 + H_{13}h^3, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха на нулевой высоте;  $H_1(h)$  – шкала высот;  $H_{10} = 10351,8$  м;  $H_{11} = -3,68512 \cdot 10^{-2}$ ;  $H_{12} = -1,02368 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ ;  $H_{13} = 2,63363 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-2}$ .

На угол атаки наложены ограничения:

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \quad (4)$$

где  $a_{\min} = 0$ ,  $a_{\max} = 10^\circ$ .

Начальные условия движения имеют следующие значения:  $M_0 = 1,921$ ;  $q_0 = 13,8^\circ$ ;  $h_0 = 11000$  м;  $m_0 = 290000$  кг [1].

Конечные условия движения по высоте и скорости определяются границами работоспособности КСУ ( $h_k = 30000$  м,  $M_k = 6$ ) [1]. Конечный угол наклона траектории определяется участком полёта ГМС после разгона и набора высоты. ГМС начинает маршевый полёт с нулевым углом наклона траектории ( $q_k = 0$ ).

**Номинальная программа управления углом атаки.** В качестве номинальной используется ступенчатая программа управления углом атаки [3]:

$$a = \begin{cases} a_1, & t < t_p; \\ a_2, & t \geq t_p, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $t_p$  – параметры, подлежащие определению.

В [3] определены значения параметров программы управления углом атаки ГМС, обеспечивающие выполнение конечных условий движения при минимальных затратах топлива:  $a_1 = 0,45^\circ$ ,  $a_2 = 6^\circ$ ,  $t_p = 62,5$  с.

**Моделирование возмущённого движения.** Моделирование проводилось путём решения системы уравнений (1) при возмущениях плотности атмосферы и отклонениях аэродинамических характеристик для номинальной программы управления углом атаки (5).

Использовались две модели случайных возмущений плотности атмосферы.

В первой модели  $\rho(h)$  представляется как случайная величина, распределённая по нормальному закону с математическим ожиданием  $\rho_{станд}(h)$ , вычисляемым по формуле (2).

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\rho(h)$  определяется соотношением [4]:

$$s_r(h) = s_{r0} \cdot \exp(-0,15 h), \quad (6)$$

где  $s_{r0} = 50$  г/м<sup>3</sup> – средняя величина, соответствующая условиям на нулевой высоте.

Нормальный закон распределения плотности воздуха с указанными характеристиками получен линейным преобразованием нормального закона случайной величины  $\zeta$  с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице:

$$r(h) = r_{станд}(h) + xS(h). \quad (7)$$

В полученной выборке решений системы уравнений (1) для этой модели возмущений плотности атмосферы только в 20% случаев конечные условия движения выполняются с заданной точностью (по высоте  $e_h = 10$  м, по скорости  $e_M = 0,01$  М, по углу наклона траектории  $e_q = 0,1^\circ$ ).

Во второй модели  $\rho(h)$  записывается в виде спектрального канонического разложения:

$$\rho(h) = \rho_{станд}(h) + \sigma_\rho(h) \sum_{v=1}^n \sigma_{\rho v} (\gamma_v \cos \Omega_v h + \varepsilon_v \sin \Omega_v h), \quad (8)$$

где  $s_{rn}$  – среднее квадратическое отклонение случайных коэффициентов;  $g_n$ ,  $e_n$  – нормально распределённые случайные числа с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;  $W_n$  – частоты;  $n = 11$  [4].

В полученной выборке решений для этой модели конечные условия движения с заданной точностью не выполняются ни в одном из случаев [5].

Поскольку для модели возмущений (8) получены худшие результаты, чем для модели (7), то в дальнейших исследованиях возмущённого движения ГМС при командном управлении использовалась только модель атмосферных возмущений (8).

Возмущения аэродинамических характеристик, приводящие к уменьшению

аэродинамического качества ГМС, рассматривались как одновременное уменьшение коэффициента подъёмной силы и увеличение коэффициента силы лобового сопротивления на величину  $D$  (в процентах). Моделирование показало, что уже при  $D = 1\%$  не обеспечивается выполнение конечных условий движения с заданной точностью по скорости и углу наклона траектории.

**Командное управление.** Для компенсации влияния возмущений на конечные условия движения предложен следующий алгоритм терминального управления по определению командного угла атаки и секундного расхода топлива.

При управлении по углу атаки в общем случае имеется три параметра  $\alpha_1$ ,  $t_p$ ,  $\alpha_2$  номинальной программы (б), изменяя которые можно компенсировать влияние действия возмущений на конечные значения трёх контролируемых фазовых координат: высоты  $h_k$ , скорости  $M_k$  и угла наклона траектории  $\theta_k$ . Поскольку они прогнозируются в результате интегрирования дифференциальных уравнений движения (1), то одна из фазовых координат всегда имеет заданное конечное значение, т. к. это является условием окончания интегрирования. Поэтому в регулировании нуждаются две фазовые координаты.

Возникает вопрос о соответствующем выборе двух параметров управления на участке движения ГМС до момента переключения  $t_p$ . Угол атаки  $\alpha_1$  является определяющим для обеспечения разгона ГМС на начальном этапе рассматриваемого участка движения, происходящего в плотных слоях атмосферы, поскольку набор высоты происходит за счёт достаточно большого начального угла наклона траектории. Поэтому в дальнейшем при терминальном управлении будем использовать два параметра, а именно  $\alpha_2$  и  $t_p$ .

При движении после переключения угла атаки при терминальном управлении остаётся один параметр  $\alpha_2$  при двух крайних условиях. Поэтому на этом участке

движения используется второй параметр управления — секундный расход топлива  $\beta$ .

На каждом шаге управления  $i$  длительностью  $Dt$  алгоритм формирования командного угла атаки и секундного расхода топлива представляет следующую последовательность действий.

1) Прогнозирование движения до выполнения одного из трёх заданных конечных условий движения.

2) Принятие решения о необходимости коррекции управления.

3) Формирование командного управления:

а) при  $t_i + \Delta\tau < t_p$  решается двухточечная краевая задача определения параметров  $\alpha_2$  и  $t_p$ , обеспечивающих выполнение тех конечных условий движения, по которым в результате прогнозирования определены отклонения, требующие устранения;

б) при  $t_i + \Delta\tau \geq t_p$  решается двухточечная краевая задача определения параметров  $\alpha_2$  и  $\beta$ , обеспечивающих выполнение тех конечных условий движения, по которым в результате прогнозирования определены отклонения, требующие устранения.

4) Проверка выполнения ограничений по углу атаки и секундному расходу топлива.

5) Прогнозирование движения с полученным управлением.

6) Принятие решения о необходимости следующей итерации для определения командного управления. Итерация проводится, если улучшается хотя бы одно значение из  $h_k$ ,  $\theta_k$ ,  $M_k$  и при этом ухудшается не более одного из двух других.

Двухточечная краевая задача решается методом Ньютона.

**Результаты моделирования.** Для проверки работоспособности и эффективности предложенного алгоритма управления проведено моделирование движения при идеальной навигации, ориентации и стабилизации ГМС в условиях возмущений плотности атмосферы при отклонениях аэродинамических характе-

ристик и при совместном действии этих возмущений. Шаг управления принят постоянным и равным 5 с. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости номинальных (номин) и командных (ко-

манд) зависимостей угла атаки  $\alpha$  и секундного расхода топлива  $b$  от времени  $t$  для одного из вариантов возмущений плотности атмосферы.

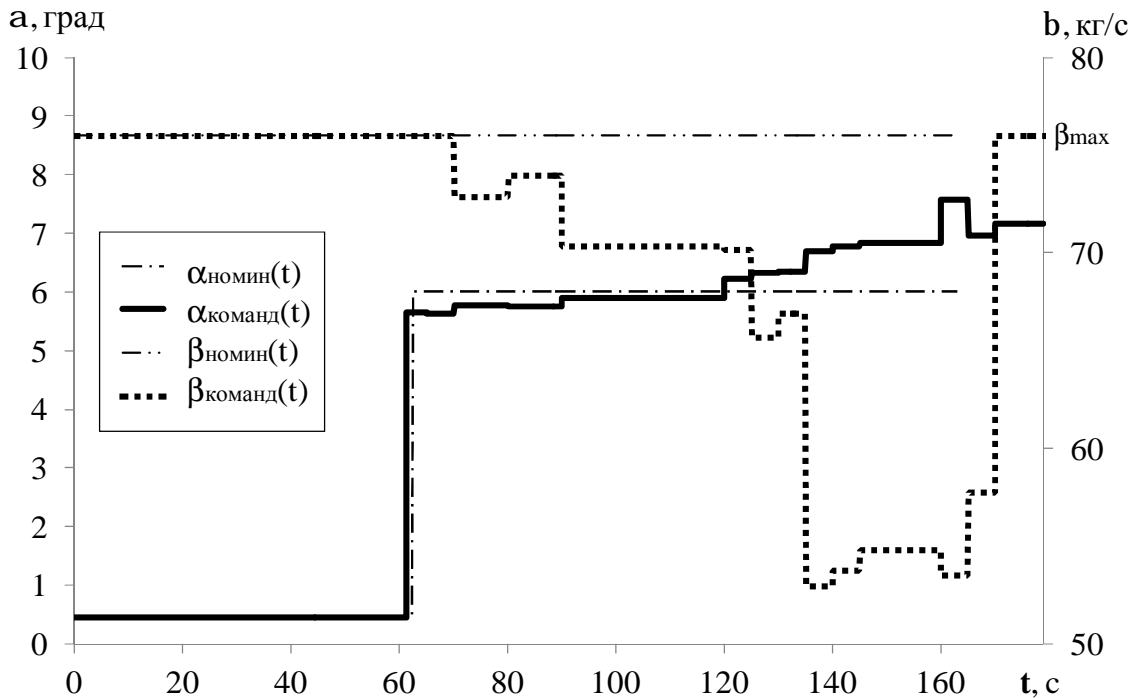


Рис. 1. Изменение угла атаки и секундного расхода топлива

При возмущениях плотности атмосферы двухканальное управление обеспечивает выполнение конечных условий движения при введении дополнительного участка горизонтального разгона ГМС. При одноканальном управлении по углу атаки также требуется введение дополнительного участка разгона, если предусматривается обязательное выполнение заданного конечного условия по высоте [6].

При ухудшении аэродинамических характеристик до 10% двухканальное управление обеспечивает выполнение конечных условий движения без введения дополнительного участка. При одноканальном управлении требуется введение дополнительного участка горизонтального разгона [6].

При совместном действии атмосферных и аэродинамических возмущений двухканальное управление обеспечивает выполнение конечных условий дви-

жения без введения дополнительного участка при ухудшении аэродинамических характеристик до 5%. Проведённое моделирование показало, что одноканальное управление при совместном действии возмущений обеспечивает выполнение конечных условий движения при ухудшении аэродинамических характеристик только до 3% с введением дополнительного участка горизонтального разгона.

Таким образом, предложенный алгоритм двухканального управления по углу атаки и секундному расходу топлива имеет преимущества перед одноканальным управлением по углу атаки при действии аэродинамических возмущений.

#### Библиографический список

1. Нечаев, Ю. Н. Силовые установки гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов [Текст] / Ю. Н. Нечаев. – М.: Издание

Академии Космонавтики им. К. Э. Циолковского, 1996. – 214 с.

2. Седунов, Ю. С. Атмосфера. Справочник [Текст] / Ю. С. Седунов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 510 с.

3. Балакин, В. Л. Оптимизация движения гиперзвукового самолёта-разгонщика двухступенчатой авиационно-космической системы [Текст] / В. Л. Балакин, А. А. Бебяков, А. Г. Кочян // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2007. – № 1. – С. 23-32.

4. Школьный, Е. П. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов [Текст] / Е. П. Школьный,

Л. А. Майборода. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 308 с.

5. Балакин, В. Л. Возмущённое движение гиперзвукового летательного аппарата на этапе «разгона-набора высоты» [Текст] / В. Л. Балакин, А. Г. Кочян // Сборник трудов XIII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. - Самара. – 2007. – Т. 1. – С. 54-57.

6. Кочян, А. Г. Командное управление углом атаки гиперзвукового летательного аппарата на участке разгона-набора высоты [Текст] / А. Г. Кочян // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2009. — № 1. – С. 30-40.

## COMMAND CONTROL OF HYPERSONIC CRUISING AIRCRAFT DURING CLIMB

© 2012 V. L. Balakin, A. G. Kotchyan

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The problem of forming command control for a hypersonic cruising aircraft during climb is discussed. The motion is analyzed under atmospheric density disturbance and deviations from aerodynamic characteristics of the aircraft. A two-channel control algorithm is proposed: by the angle of attack and fuel consumption per second. The algorithm efficiency as regards compensating the disturbance influence on meeting the final motion conditions is analysed.

*Hypersonic cruising aircraft, disturbed motion, command control, angle of attack, fuel consumption per second.*

### Информация об авторах

**Балакин Виктор Леонидович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой динамики полёта и систем управления, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [balakin@ssau.ru](mailto:balakin@ssau.ru). Область научных интересов: динамика и управление движением летательных аппаратов.

**Кочян Антонина Грачевна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры динамики полёта и систем управления, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [antonina.kochyan@gmail.com](mailto:antonina.kochyan@gmail.com). Область научных интересов: динамика и управление движением летательных аппаратов.

**Victor L. Balakin**, head of the department of flight dynamics and control systems, professor, doctor of science (engineering), Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [balakin@ssau.ru](mailto:balakin@ssau.ru). Area of research: dynamics and aircraft motion control.

**Kotchyan, Antonina Gratchevna**, assistant of the department of flight dynamics and control systems, candidate of technical sciences, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [antonina.kochyan@gmail.com](mailto:antonina.kochyan@gmail.com). Area of research: dynamics and control of aircraft propulsion.

УДК 629.7.01

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2012 А. В. Болдырев, В. А. Комаров

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Даётся обзор методов моделирования силовых конструкций на этапе эскизного проектирования. Рассматривается применение модели твёрдого деформируемого тела переменной плотности в задачах оптимизации и прогнозирования массы летательных аппаратов. Обсуждаются вопросы адекватности модели переменной плотности. Приводятся численные примеры.

*Оптимизация, конструкция, алгоритм, прочность, жёсткость, устойчивость, модель переменной плотности, прогнозирование, масса, деформация.*

### Введение

На современном этапе развития различных отраслей промышленности для разработки сложных наукоёмких объектов, включая изделия ракетно-космической техники, всё чаще используется метод нисходящего проектирования [1]. Его сущность заключается в том, что сначала разрабатывается концептуальная модель изделия высокого уровня, а затем эта информация используется в процессе проектирования компонентов на более низком уровне. При этом подходе адекватность модели высокого уровня оказывает существенное влияние на эффективность всего проекта.

На ранних этапах проектирования летательных аппаратов (ЛА) для правильного задания нагрузок и решения ряда других вопросов – выбора силовых схем, проектирования систем управления и т. п. – необходимо знание (прогнозирование) жёсткостных и весовых характеристик конструкции. Для решения этих задач может быть использована математическая модель деформируемого твёрдого тела переменной плотности. Такое тело содержит внутри себя самые разнообразные конструкции, в том числе и рациональные, близкие к оптимальным, которые

могут быть образованы сгустками материала с повышенной плотностью и пустотами там, где это целесообразно.

Идея применения в процессе проектирования конструкций модели гипотетического материала с переменным по объёму модулем упругости, по-видимому, впервые высказана и использована в работе Комарова А. А. [2] при оптимизации плоских конструкций для обхода вычислительных проблем, связанных с расчётом напряжённо - деформированного состояния пластин переменной толщины. В этой работе задача отыскания наиболее жёсткой конструкции решается при фиксированном количестве материала, определяемого как интеграл от модуля упругости по объёму конструкции. Оптимизация конструкций в трёхмерной постановке с использованием материала переменной плотности с учётом требований по прочности и жёсткости рассмотрена в [3]. В дальнейшем эта идея получила развитие в ряде работ [4-17].

Вариант моделирования тела с переменной плотностью с помощью конечных элементов, имеющих внутри себя пустоты, и использование его в топологической оптимизации можно найти в [4] и в по-

следующем большом числе публикаций, обзор которых приведён в [6].

Цель данной работы - показать применение модели тела переменной плотности [3] в решении ряда задач оптимизации конструкций ЛА.

### Теоретические основы

Следуя [2, 3, 9], введём в рассмотрение гипотетический материал переменной плотности  $r$ . Будем считать, что его модуль упругости и прочностные характеристики пропорциональны плотности

$$E = r \bar{E}, \quad (1)$$

$$\bar{s} = r \bar{s}, \quad (2)$$

где  $\bar{s}$  – допускаемое напряжение материала;  $\bar{E}$  и  $\bar{s}$  – модуль упругости и допускаемое напряжение при единичной плотности – удельные характеристики материала.

Предположим, что известны внешние и внутренние границы конструкции, то есть область, в которой она может размещаться. Например, для крыла – это внешние обводы с вычетом частей, занятых элеронами, механизацией и т.п. Заполним допустимую область материалом с переменной плотностью. Будем предполагать, что расчёт напряжённо-деформированного состояния выполняется методом конечных элементов.

Рассматривается следующая оптимизационная задача. За проектные переменные принимается плотность материала в трёхмерных конечных элементах  $r_i$  при фиксированных величинах  $\bar{E}$  и  $\bar{s}$ , где  $i$  – номер элемента.

Минимизируется масса упругой среды

$$m(r) = \sum_{i=1}^n r_i V_i \rightarrow \min \quad (3)$$

при функциональных ограничениях  $g_j$ :

$$g_j(r) = C_j(r) - \bar{C}_j \leq 0, \quad (j=1, 2, \dots, p), \quad (4)$$

где  $C_j$  и  $\bar{C}_j$  –  $j$ -я переменная состояния конструкции и её допускаемое значение;  $p$  – количество функциональных ограничений. Переменными состояния конструкции  $C_j$  являются обобщённые перемещения и критические усилия потери устойчивости.

Область поиска задаётся так:

$$r_i \geq r_i^{\min}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где  $r_i^{\min}$  – ограничение снизу для  $i$ -й проектной переменной, которое учитывает ограничение на напряжение в соответствующем элементе на основе концепции *полнонапряжённости* [3,1] в следующем виде:

$$r_i^{\min} = r_i \max_j (s_{ij} / \bar{s}), \quad (j=1, 2, \dots, s), \quad (6)$$

где  $s$  – количество случаев нагружения;  $s_{ij}$  – эквивалентные напряжения по принятой теории прочности в  $i$ -м элементе при  $j$ -м случае нагружения.

Алгоритм оптимизации распределения материала в теле переменной плотности при заданных нагрузках описан в [3]. С упрощениями для одного случая нагружения он имеет следующий вид.

1. *Задаётся начальное распределение плотностей и соответствующих модулей упругости элементов  $E_{0i}$ , назначаемых по (1), где  $i$  – номер элемента.*

2. *Рассчитывается напряжённое состояние трёхмерного тела.*

3. *Определяются эквивалентные напряжения в каждом элементе  $S_{0i}^{\text{экв}}$  по принятой теории прочности, например по условию текучести Генки-Губера-Мизеса:*

$$S^{\text{экв}} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 - s_1 s_2 - s_2 s_3 - s_3 s_1},$$

где  $s_1, s_2, s_3$  – главные напряжения.

4. *Вычисляются новые значения плотностей элементов  $r_{1i}$  по*



$$r_{li} = s_{0i}^{эKB} / \bar{s}. \quad (7)$$

5. *Задаются новые плотности элементов, и расчёт повторяется до стабилизации.*

В трёхмерном теле переменной плотности напряжения можно рассматривать как внутренние усилия и по ним подбирать необходимую плотность и прочность материала в соответствующих местах. Смысл вычисления новых плотностей по (7) состоит в том, что если бы распределение эквивалентных напряжений по элементам не зависело от распределения жёсткостей, то во всех элементах было бы реализовано одинаковое допускаемое удельное напряжение

$$s_{0i}^{эKB} / r_{li} = \bar{s} = \text{const}, \quad (8)$$

что можно истолковать как получение равнопрочной конструкции.

Однако неравномерное изменение жёсткостей по (7) вызывает изменение распределения напряжений. Поэтому в рассмотренном алгоритме расчёт повторяется до получения специфической полнонапряжённой конструкции.

В [3, 7] дано доказательство сходимости алгоритма 1 – 5 для случая, когда эквивалентные напряжения вычисляются через удельную потенциальную энергию. В [2, 3, 7] также доказано, что в этом случае алгоритм 1 – 5 приводит к конструкциям с минимальным значением силового фактора  $G$ , который для трёхмерного тела вычисляется следующим образом:

$$G = \int_V s^{эKB} dV \approx \sum_{i=1}^n s^{эKB} V_i, \quad (9)$$

где  $V$  – объём тела,  $V_i$  – объём конечного элемента,  $n$  – число элементов.

Силовой фактор выражает одновременно величину внутренних сил в элементах конструкции и протяжённость их действия.

Достижение минимального значения силового фактора свидетельствует об отыскании конструкции минимальной массы для заданной нагрузки [5], так как они связаны соотношением

$$m_i = r \frac{G}{[s]}, \quad (10)$$

где  $m_i$  – теоретическая масса конструкции,  $r$  и  $[s]$  – плотность и допускаемое напряжение реального конструкционного материала.

Практические расчёты показывают, что вычисление эквивалентных напряжений по условию (3) не оказывает заметного влияния на сходимость алгоритма [3] и на характер изменения силового фактора по итерациям. Алгоритм сходится за 10-20 итераций, существенные изменения в распределении плотностей наблюдаются на первых 4-5 итерациях. В конструкциях типа крыла, где превалирует изгиб, уменьшение силового фактора по итерациям составляет величину порядка 30% [9].

В качестве примера на рис. 1 показано оптимальное распределение плотностей в бруске с квадратным поперечным сечением, нагруженном кручением.

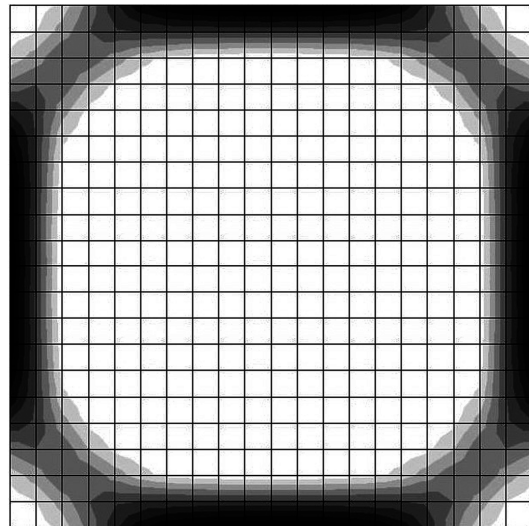


Рис. 1. Распределение материала в сечении теоретически оптимального бруса

На рис. 2 показано распределение плотностей в конечно-элементных моделях крыльев малого удлинения в наружных слоях. В этих моделях использовалось восьмислойное разбиение на 3D-элементы.

На рис. 3 показано оптимальное распределение материала в центрально сжатом стержне с круговым и квадратным поперечным сечением. Задача решалась с учётом ограничений по критическим на-

пряжениям потери устойчивости. Для решения подобных задач разработаны специальные алгоритмы с использованием коэффициентов чувствительности [11, 12].

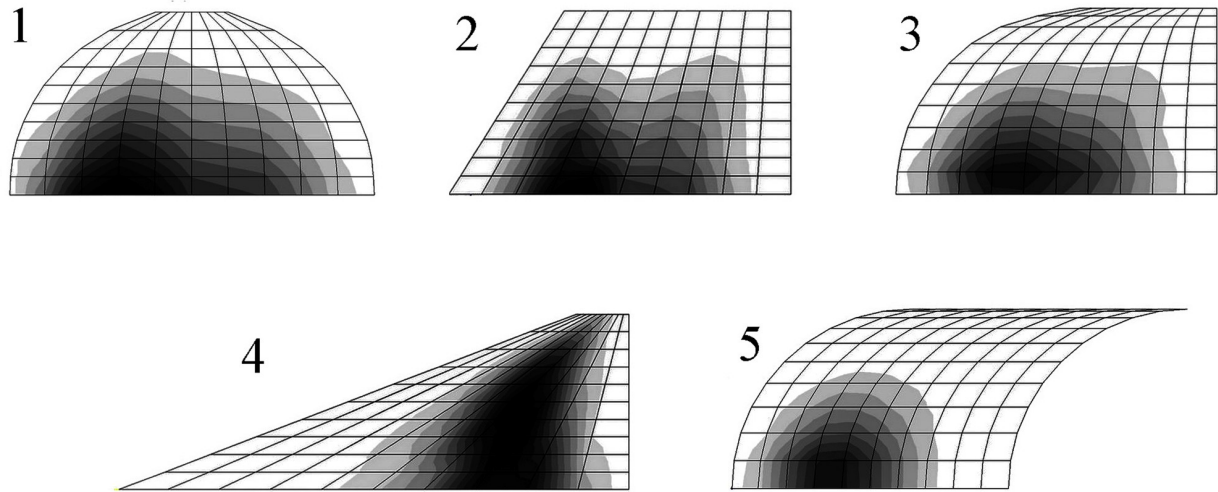


Рис. 2. Распределение материала в наружных слоях теоретически оптимальных крыльев

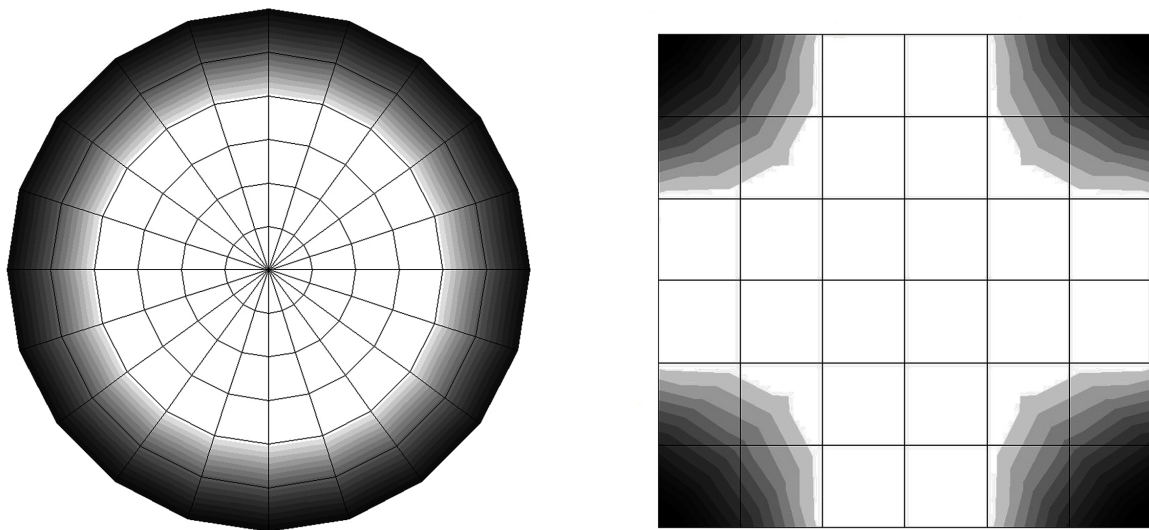


Рис. 3. Распределение материала в сечениях теоретически оптимальных стержней

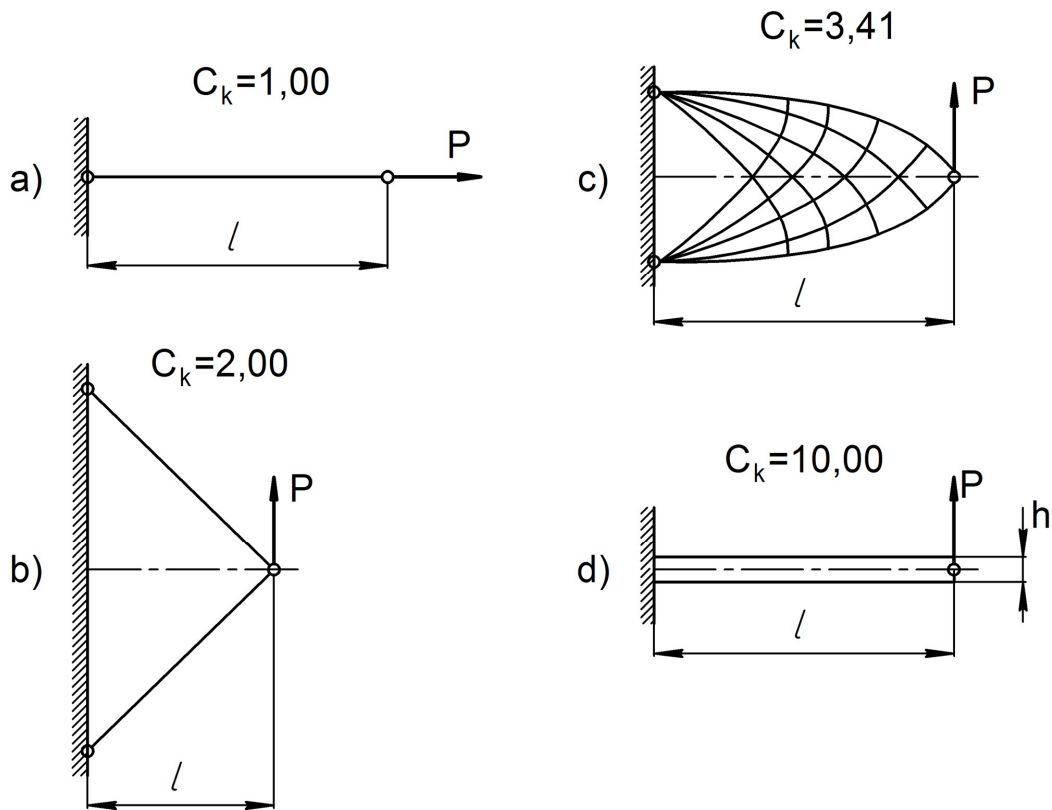


Рис. 4. Значение коэффициента силового фактора для различных конструкций

Масса конструкции может быть определена через силовой фактор [5]:

$$m_s = j \cdot \frac{G}{[\bar{s}]}, \quad (11)$$

где  $G$  – силовой фактор, который определяется топологией, геометрическими параметрами и внешними нагрузками конструкции;  $[\bar{s}]$  – удельная прочностная характеристика реального конструкционного материала;  $j$  – коэффициент полной массы, показывающий отношение полной массы реальной конструкции к массе силовых элементов, размеры которых назначаются по прочностным соображениям. Этот коэффициент может быть определен из ретроспективного анализа и скорректирован с учётом прогноза конструктивно-технологического совершенства нового проекта.

Соотношение (11) представляет собой своего рода весовое уравнение, которое не накладывает никаких ограничений на компоновку летательного аппарата, так как силовой фактор вычисляется с ис-

пользованием МКЭ и может быть определён для любого типа конструкций.

Определённым недостатком критерия «силовой фактор» является его размерность, так как на ранних стадиях проектирования особый интерес представляет прогнозирование относительной массы конструкции. Для преодоления этого недостатка в [5] предложен безразмерный критерий силового совершенства конструкций  $C_k$ , названный «коэффициент силового фактора», который вычисляется по следующему соотношению:

$$C_k = \frac{G}{P \cdot L}, \quad (12)$$

где  $P$  и  $L$  – характерные нагрузка и размер конструкции.

На рис. 4 показаны примеры простейших конструкций (стержня, двухстержневой фермы, конструкции Мичелла, двухпоясной балки) с указанием величины коэффициента силового фактора.

В этих примерах в качестве характерной нагрузки выбрана сосредоточенная сила, а в качестве характерного размера - расстояние от точки приложения силы до закрепления.

Безразмерный коэффициент  $C_K$  ставит в соответствие каждой топологической структуре определённое число, которое характеризует её силовое совершенство.

Через коэффициент силового фактора, если он известен, может быть определён силовой фактор  $G$ :

$$G = C_K PL, \quad (13)$$

и далее по (11) определена масса конструкции. Коэффициент  $C_K$  с точностью до множителей определяет массу конструкции.

Здесь следует отметить аналогию с определением подъёмной силы через безразмерный коэффициент подъёмной силы  $C_L$ :

$$L = C_L qS, \quad (14)$$

где  $q$  - скоростной напор,  $S$  - площадь крыла (характерный размер).

Если для крыла использовать в качестве характерного размера корень квадратный из площади  $\sqrt{S}$ , а в качестве характерной нагрузки - величину подъёмной силы  $L$  для расчётного случая нагружения, то можно получить следующие весовые уравнения:

для определения относительной массы крыла

$$\bar{m}_{wing} = \frac{\Phi}{[\bar{S}]} C_K \cdot n \cdot g \cdot \sqrt{S}; \quad (15)$$

для определения полной массы

$$m_{wing} = \frac{j}{[\bar{S}]} C_K \cdot n \cdot m_o \cdot g \cdot \sqrt{S}, \quad (16)$$

где  $n$  - расчётная перегрузка,  $m_o$  - взлётная масса.

#### Особенности и возможности новой модели

Одной из первых исследовательских работ, в которых использовалась модель тела переменной плотности, была задача

об определении весовой и аэродинамической эффективности ступенчатого крыла [15]. Эта работа показала, что с использованием современных генераторов сеток в конечно-элементных системах 3D-модели создаются чрезвычайно просто, а также достаточно простые дополнительные программы позволяют рассчитывать коэффициент силового фактора.

Для оценки точности прогнозирования жёсткостных и весовых характеристик конструкции, которые могут быть достигнуты в результате её детальной проработки, в работе [14] предложена оригинальная методика. Специально проведённое исследование [14, 16] показало, что при соблюдении рекомендаций, сформулированных в [16], погрешность результатов, полученных на модели тела переменной плотности, составляет 3-5%, что свидетельствует о применимости модели переменной плотности на ранних стадиях проектирования конструкций ЛА.

Интерпретация результатов оптимизации распределения материала в 3D-моделях с переменной плотностью представляет собой самостоятельную нетривиальную задачу. Однако использование специальных конечно-элементных сеток со слоистой структурой, например для крыльев, и использование визуального изображения потоков главных усилий в наружных элементах и главных касательных сил во внутренних элементах существенно облегчает её решение [3].

Применение 3D-моделей переменной плотности со свойствами (1)-(2) позволяет решать широкий круг проектных задач:

- топологической оптимизации силовых конструкций [3, 12, 17];
- исследования весовой эффективности новых аэродинамических компоновок [13, 15];
- модификации конструкций топологическими средствами [7, 10];
- прогнозирования массы конструкции на ранних стадиях проектирования [5, 9, 12];

- оптимизации облика ЛА [13];
- прогнозирования и учёта деформаций конструкции [8, 9];
- оптимизации конструкции со сложными ограничениями по жёсткости [11] и устойчивости при сжатии [12].

### Заключение

Математическая модель тела переменной плотности обладает большим предсказательным потенциалом. Она позволяет генерировать рациональные топологические структуры и давать оценку минимальной теоретической, полной и относительной массы, которая может быть достигнута после детальной проработки конструкции. Разработанные алгоритмы оптимизации учитывают широкий спектр ограничений по прочности, жёсткости, устойчивости при сжатии и конструктивно-технологическим требованиям. Модель тела переменной плотности даёт возможность достаточно просто и с высокой точностью прогнозировать деформации крыльев на ранних стадиях проектирования и учитывать их влияние на распределение нагрузки по размаху. Рассмотренный новый безразмерный критерий силового совершенства позволяет ставить и решать задачи об оптимизации облика самолёта с одновременным учётом его весовой и аэродинамической эффективности. Коэффициент силового фактора может быть использован для накопления знаний о весовой эффективности различных топологических структур, сравнения вариантов и других приложений. Разработка 3D-моделей из объёмных элементов, как правило, значительно проще, чем создание тонкостенных моделей авиационных конструкций. Использование новой оптимизационной модели представляется наиболее целесообразным для разработки самолётов с нетрадиционными внешними формами.

Работа выполнена с поддержкой по ФЦП «Научно- и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-

2013 годы, государственный контракт №14.740.11.0126 от 13.09.2010 г.

### Библиографический список

1. Комарова, Л. А. Применение технологии нисходящего проектирования, основанной на решениях Windchill PDMLink и САПР Pro/ENGINEER, для разработки изделий ракетно-космической техники [Текст] / Л. А. Комарова, А. Н. Филатов. // Изв. СНЦ РАН.– 2011.– Т. 13.– №1(2). – С. 297-303.
2. Комаров, А. А. Основы проектирования силовых конструкций [Текст] / А. А. Комаров. – Куйбышев: книж. изд-во, 1965.
3. Комаров, В. А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций [Текст] / В. А. Комаров. // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. – М.: Машиностроение, 1984.– С. 114-129.
4. Bendsoe, M. P. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method [Text] / M. P. Bendsoe, N. Kikuchi. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.– 1988.– V. 71.– P. 197–224.
5. Комаров, В. А. Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы [Текст] / В. А. Комаров. // Общероссийский научно-технический журнал “Полет”.– 2000.– №1.– С. 31-39.
6. Eschenauer, H. A. Topology optimization of continuum structures: A review [Text] / H. A. Eschenauer, N. Olhoff. // Appl. Mech. Rev.– 2001.– V. 54.– № 4. – P.331-389.
7. Комаров, В. А. Повышение жёсткости конструкций топологическими средствами [Текст] / В. А. Комаров. // Вестн. СГАУ. – 2003.– №1. – С.24-37.
8. Болдырев, А. В. Структурная оптимизация несущих поверхностей с учётом статической аэроупругости [Текст] / А. В. Болдырев, В. А. Комаров. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 2.– С. 3-6.
9. Учёт статической аэроупругости на ранних стадиях проектирования

[Текст] / А. В. Болдырев, В. А. Комаров, М. Ю. Лаптева [и др.] // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2008. – №1. – С. 34-39.

10. Болдырев, А. В. Структурная модификация тонкостенных конструкций с учётом требований жёсткости [Текст] / А. В. Болдырев. // Проблемы прочности и пластичности. – 2008. – Вып. 70. – С. 175-183.

11. Болдырев, А. В. Структурная оптимизация крыльев с учётом требований прочности и жёсткости [Текст] / А. В. Болдырев. // Вестн. МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 3. – С. 15-21.

12. Болдырев, А. В. Развитие технологии проектирования авиационных конструкций на основе модели переменной плотности [Текст] / А. В. Болдырев. // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2009. – № 11. – С. 23-28.

13. Болдырев, А. В. Весовой анализ крыльев нетрадиционной конфигурации [Текст] / А. В. Болдырев. // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2009. – № 10. – С. 57-60.

14. Болдырев, А. В. Об оценке точности прогнозирования деформаций крыла на основе модели переменной плотности [Текст] / А. В. Болдырев, В. А. Комаров, М. Ю. Лаптева. // Вестн. КГТУ. – 2009. – № 3. – С. 13-15.

15. Комплексный учёт весовой и аэродинамической эффективности крыльев в проектировании самолётов [Текст] / А. А. Вырыпаев, Д. М. Козлов, В. А. Комаров [и др.] // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2010. – №10. – С. 35-44.

16. Комаров, В. А. Прогнозирование деформаций крыльев [Текст] / В. А. Комаров, М. Ю. Лаптева. // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2011. – №3. – С. 8-12.

17. Болдырев, А. В. Применение модели переменной плотности на ранних стадиях проектирования крыльев [Текст] / А. В. Болдырев, В. А. Комаров. // Ученые записки ЦАГИ. – 2011. – Т. XLII. – №1. – С. 94-104.

## HIGH FIDELITY MODELING AT EARLY STAGES OF AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN

©2012 A. V. Boldyrev, V. A. Komarov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

A review of methods for modeling load-carrying structures at the preliminary design stage is presented. The application of elastic body model with variable density to design optimization and weight estimation is considered. The validity of the variable density model is discussed. A number of numerical examples are given.

*Optimization, structure, algorithm, strength, stiffness, stability, model of variable density, prediction, weight, deformation.*

### Информация об авторах

**Болдырев Андрей Вячеславович**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [bolav@ssau.ru](mailto:bolav@ssau.ru). Область научных интересов: оптимальное проектирование силовых конструкций.

**Комаров Валерий Андреевич**, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vkomarov@ssau.ru](mailto:vkomarov@ssau.ru). Область научных интересов: оптимальное проектирование силовых конструкций.

**Andrey V. Boldyrev**, Candidate of technical sciences, associated professor of the aircraft design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [bolav@ssau.ru](mailto:bolav@ssau.ru). Area of research: optimal design of load-bearing structures.

**Valeriy A. Komarov**, Doctor of technical sciences, professor, Head of the aircraft design department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vkomarov@ssau.ru](mailto:vkomarov@ssau.ru). Area of research: optimal design of load-bearing structures.

УДК 629.78:621.3

## СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЦИКЛЕ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

©2012 В. Н. Гришанов<sup>1</sup>, А. А. Ойнонен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)  
<sup>2</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

Рассматриваются современные методы контроля геометрии изделий лазерными измерительными системами. Описаны основные принципы измерения и примеры устройств, их реализующие. Показаны преимущества лазерных измерительных систем над контактными. Проанализированы сложности, возникающие при интеграции лазерных измерительных систем в производственную цепочку предприятия, и намечены пути их преодоления.

*Лазерный контроль геометрии, бесконтактные измерения, шаблон, лазерный трекер, крупногабаритный объект.*

### Введение

Важнейшим критерием качества продукции является соответствие геометрии изделия требованиям конструкторской документации. Если геометрию простых деталей или сборок легко измерить традиционными контактными механическими инструментами, то в случае сложных по форме конструкций это не всегда возможно. В изделиях космической техники сложных сборок – большинство, поэтому проблема контроля их геометрии стоит особенно остро.

С середины прошлого века контроль геометрии значительной части деталей и сборок проводят с помощью различных шаблонов. Технология подобного контроля отработана, проста, но имеет ряд принципиальных недостатков, т.к. на каждую группу контролируемых элементов требуется изготавливать свой шаблон. Эта технология часто не показывает величину отклонения от требований, заложенных в конструкторской документации. При внесении существенного изменения в конструкцию изделия шаблон приходится заменять. Сложность оснастки и самой процедуры измерений геометрии с применением шаблонов можно видеть на примерах, описанных в работах [1, 2].

Основными измерительными задачами, которые встают в процессе сборки космических аппаратов, можно считать контроль геометрии отдельных элементов, а также проверку взаимного расположения элементов изделия, особенно при креплении внешних координатных датчиков [3, 4]. Контроль необходим на всех этапах производства. Задачи измерения и определения положения решаются в робототехнических системах, в частности, для правильной стыковки корпусных элементов летательного аппарата.

Попытки использования лазерных систем в самолётостроении предпринимались со времени начала серийного производства лазеров [5, 6]. Тогда же были заложены принципы функционирования и классификации лазерных систем измерения геометрических параметров (ЛСИГП). Однако разработанные в 70-80-е годы XX века ЛСИГП серийно не производились, предусматривали визуальный отсчёт показаний, требовали высококвалифицированного обслуживающего персонала, и их применение ограничивалось рамками одного предприятия, возможности которого позволяли изготовить и аттестовать подобные устройства.

Современные автоматизированные ЛСИГП лишены недостатков, свойствен-



ных вышеупомянутым разработкам. Они производятся серийно, аттестуются, измерительная информация считывается фотоприёмными устройствами и оцифровывается. В связи с этим они находят всё более широкое применение во многих отраслях промышленности, особенно в машиностроении. Интерес к этим системам вызван их высокой точностью и производительностью в сочетании с бесконтактным способом производства самих измерений и цифровой формой представления результатов. Ещё одно преимущество ЛСИГП обусловлено их компактностью, т.е. их легко приблизить к измеряемому объекту, разместить в сборочном цехе в отличие от, например, координатно-измерительных машин, действие которых предполагает размещение измеряемого объекта на их столе.

С развитием новых информационных CAD/CAM-технологий возрастает актуальность внедрения компьютеризированных систем измерения геометрии в технологических процессах сборки и испытаний. Внедрение ЛСИГП позволит в ряде производственных процессов замкнуть контур обратной связи, т.е. перейти от CAD/CAM-технологий к CAD/CAM/CAMeas-технологиям (measurement – измерение) [7]. Пример цифровой цепочки от этапа конструирования современного самолёта до сборки готового изделия с применением ЛСИГП приведён в работе [8].

### **Лазерные системы измерения геометрических параметров**

ЛСИГП могут функционировать на различных принципах, реализующих те или иные свойства лазерного излучения, обусловленные его когерентностью. Монохроматичность используется для защиты от фонового излучения, направленность, благодаря концентрации энергии, позволяет проводить измерения на протяжённых трассах, пространственная и временная когерентности лежат в основе разнообразных интерференционных схем из-

мерения. Использование коротких и сверхкоротких лазерных импульсов подсветки сводит многие задачи динамических измерений к статическим, устраняя влияние вибраций и смещений объекта. Управление параметрами излучения как в пространственной (структурированные лазерные пучки), так и временной (длительность импульсов, частота электромагнитной волны) способствует дальнейшему расширению спектра дистанционных бесконтактных методов измерения геометрических параметров изделий.

В области измерений линейных размеров корпусных изделий аэрокосмического назначения с характерной длиной  $\sim 1 \dots 10$  м и допустимыми погрешностями  $0,01 \dots 1$  мм (фюзеляж, космические аппараты, разгонные блоки, обтекатели и т.п.), оптимальным сочетанием рабочих дистанций, погрешностей измерений и их производительности в настоящее время обладают лазерные компьютеризированные системы типа FARO Laser Tracker [9], MV200 и т.п. Они имеют рабочую зону измерений в линейной мере до 100 м, а в угловой:  $270^\circ$  по азимуту и не менее  $\pm 50^\circ$  по углу места. Погрешности измерения расстояний на дистанциях  $\sim 1$  м составляют 10 мкм и приблизительно пропорционально увеличиваются до 100 мкм на дистанциях  $\sim 10$  м, погрешность угловых измерений не превышает  $10''$ . Встроенная метеостанция позволяет частично нейтрализовать влияние параметров окружающей среды на результаты измерений.

Принцип работы лазерного трекера состоит в измерении двух углов и расстояния (рис.1). Трекер посылает лазерный луч к световозвращающему отражателю, который приводится в соприкосновение с поверхностью измеряемого объекта. Луч, отражённый от цели, возвращается по тому же пути и принимается трекером в той самой точке, откуда он был испущен. Часть отражённого световозвращателем света поступает в измеритель расстояний, который вычисляет расстояние от трекера до рефлектора. Измеритель расстояний может быть двух типов: ин-

терферометр (laser interferometers, IFM) или измеритель абсолютных расстояний (absolute distance meter, ADM).

Лазерный трекер содержит два датчика угла поворота головки (энкодера). Эти устройства измеряют угловую ориентацию двух механических осей трекера: оси азимута и оси высоты. Углов, полу-

ченных от энкодеров, и расстояния от измерителя расстояний достаточно для точного определения положения центра ретрорефлектора. Поскольку центр ретрорефлектора находится всегда на фиксированном расстоянии от измеряемой поверхности, координаты измеряемых точек или поверхностей легко вычисляются.

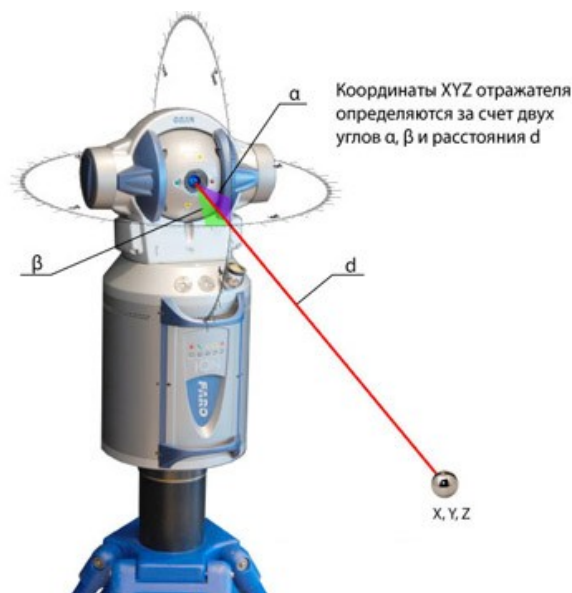


Рис. 1. Принцип определения координат с помощью лазерного трекера

В режиме интерферометра оператор помещает ретрорефлектор в исходную позицию на корпусе трекера и приводит показания интерферометра к известному расстоянию начальной позиции. По мере того, как оператор перемещает ретрорефлектор в необходимое положение на измеряемом объекте, лазерный луч следует за ним, оставаясь привязанным к центру ретрорефлектора. Этот метод работает до тех пор, пока лазерный луч от трекера до ретрорефлектора не встречает препятствия на своем пути. Но если луч обрывается, то показания счетчика теряют связь с положением ретрорефлектора и трекер выдает сигнал об ошибке. Оператор должен вернуть ретрорефлектор в опорную точку и повторить измерение.

Интерферометр реализуется на базе стабилизированного по частоте гелий-неонового лазера. Свет лазера разделяется на два луча. Один направляется прямо в интерферометр. Другой испускается тре-

кером, отражается от ретрорефлектора и на обратном пути поступает в интерферометр. Внутри интерферометра два луча интерферируют, следствием чего является циклическое изменение амплитуды электромагнитной волны всякий раз, когда ретрорефлектор приближается или удаляется от трекера на расстояние, равное половине длины волны (~0,316 мкм). Электронная схема подсчитывает количество циклических изменений интенсивности (известное как «счёт полос») для вычисления пройденного светом расстояния, которое складывается с расстоянием до опорной точки и является расстоянием относительным.

В ADM используется та или иная разновидность фазовых измерений расстояния. Например, в трекере MV200 пилообразно модулируется частота лазерного излучения, а гетеродинный фотоприёмник преобразует расстояние (запаздывание по фазе) принятого сигнала в частоту.

ту. Сегодня некоторые измерители абсолютных расстояний обладают достаточной быстротой, чтобы обеспечить высокоскоростное сканирование с пренебрежимой потерей точности. Поэтому некоторые современные трекары содержат только ADM и не используют интерферометр при измерениях. При согласовании зоны однозначности фазовых измерений с максимальной удалённостью объекта система ADM измеряет расстояние до цели автоматически, даже если луч перед этим был прерван. Кроме того, появляется возможность работы без использования ретроотражателей по любым поверхностям с коэффициентом отражения, превышающим значение  $10^{-9}$ .

Одним из отличительных признаков трекара является автоматическое управление угловыми координатами испускаемого луча. Трекары направляют луч в нужном направлении посредством поворота механических осей. Во многих приложениях трекары должны удерживать луч в центре передвигающегося ретроорефлектора. Он выполняет это, направляя часть отраженного рефлектором луча на позиционно-чувствительный детектор. Если луч лазера попадает не в центр рефлектора, то отражённый луч тоже не попадает в центр детектора позиции и формируется сигнал ошибки. Этот сигнал контролирует поворот механических осей для удержания луча лазера в центре ретроорефлектора.

Трекары позволяют с высокой точностью измерять геометрические примитивы (точки, окружности, плоскости, конусы, цилиндры и т.д.), расстояние и углы между ними, отклонение формы и взаимного расположения. Также возможно контролировать сложные криволинейные поверхности методом сравнения с CAD моделью.

Координаты точек рассчитываются компьютером в системе координат трекара за счёт известных двух углов поворота головки по горизонтали и вертикали и известной дальности до отражателя. Для измерения того или иного геометрического элемента оператор должен замерить на

его поверхности определённое количество точек. Например, для линии - минимум 2 точки, для плоскости - минимум 3 точки, для окружности - минимум 3 точки и т.д. Программное обеспечение определяет координаты центра элемента, его действительные геометрические размеры и отклонения формы. Также возможно контролировать линейно-угловые размеры между измеренными элементами и производить анализ их взаимного расположения (непараллельность, неплоскостность и т.д.). Для измерения криволинейных поверхностей деталей существует возможность импорта CAD моделей в программное обеспечение для контроля методом сравнения с CAD моделью.

Особенностью трекаров является мобильность. Трекары упаковываются в кейсы и легко транспортируются в любое место для проведения измерений. Использование магнитной плиты и треноги позволяет быстро и надёжно устанавливать лазерный трекары вблизи измеряемого объекта. Температурные датчики постоянно следят за окружающей обстановкой и вносят корректировку в результат замеров. Для контроля изделий, габариты которых превышают рабочую зону лазерных трекаров (порядка 100 м), используется метод «прыжков» относительно реперных точек. Причем все измерения производятся в одном файле и с сохранением единой системы координат.

Основные области применения лазерных трекаров:

1. Контроль крупногабаритных изделий.

Благодаря большой рабочей зоне трекары позволяют контролировать крупногабаритные детали: фюзеляжи и крылья самолетов (рис.2), корпуса судов и вагонов, кузова автомобилей, станины станков и прессов, крупные металлоконструкции т.д.

2. Сборка крупногабаритных изделий.

Особенностью лазерных трекаров является то, что они способны отслеживать положение измерительной сферы в

режиме реального времени (в динамике). Это позволяет эффективно использовать оборудование для сборки изделий из нескольких компонентов, например, стыковка крыла самолёта с фюзеляжем. Благодаря использованию трекеров можно сократить время на проведение операции в разы и отказаться от изготовления специальных измерительных шаблонов и контрольной оснастки.

3. Контроль сложных криволинейных поверхностей.

Лазерный трекер может эффективно использоваться для контроля сложных криволинейных поверхностей, например рабочих колес гидротурбин, крупногабаритных антенн, фюзеляжей самолётов и т.д. методом сравнения с САД моделью.



Рис. 2. Контроль геометрии крупногабаритных сборок

4. Настройка ступеней, сборочных линий, сварочных кондукторов.

Правильное позиционирование можно производить по известным координатам или линейно-угловым размерам. Существенно сократить время можно, используя метод сравнения с САД моделью конструкции. Это сокращает время на переналадку и запуск в производство нового изделия, а также уменьшает процент брака.

При решении преимущественно ориентационных задач перспективно использование электронных тахеометров. Они отличаются от трекеров отсутствием автоматической развёртки лазерного луча по угловым координатам и большими погрешностями в измерении расстояний, достигающими 1 мм.

подавляющая номенклатура деталей, сборок и узлов космических аппаратов и двигателей имеет характерные размеры, не превышающие 1 м [10]. Для кон-

троля их геометрических параметров существенно расширяется палитра лазерных измерительных систем - от универсальных до специализированных. Естественно, что и в этом диапазоне размеров при выдержке допусков на погрешности линейных измерений вполне пригодны вышеописанные трекеры и тахеометры, но в этом диапазоне размеров преимущественное распространение получили ЛСИГП с датчиками триангуляционного типа [11] и структурированными лазерными пучками [12] в силу относительно низкой стоимости их элементной базы.

В ЛСИГП проблема идентификации точек измеряемого объекта снимается структурированной лазерной подсветкой. Предложены разнообразные структуры лазерных пучков для применения в подобных системах [13]: коллимированный лазерный пучок, лазерная плоскость, крестообразные, конические и решетчатые структуры. Способы структурированного

подсвета, особенно с применением лазера, имеют более простые схемные реализации по сравнению с другими техническими решениями дистанционных бесконтактных измерений. За счёт структурированной подсветки с помощью одного двумерного датчика воспринимается и анализируется глубина сцены, т.е. трёхмерная информация.

Для прецизионных измерений геометрических параметров с погрешностями, не превышающими длину волны используемого излучения, по-прежнему привлекаются разнообразные интерферометры. Современные тенденции в применении классических интерферометрических схем состоят в фиксации интерферограмм матричными фотоприёмниками с последующем вводом пространственных распределений интенсивности в ПЭВМ и автоматизированной обработке зафиксированных цифровых изображений. Голо-

графические интерферометрические системы, где возможно, заменяются спекл-интерферометрическими [13]. Преимущество последних заключается в прямой фиксации цифровых изображений – картин распределения спеклов - и исключении использования высокоразрешающих фотоматериалов и процессов их обработки.

Схема триангуляционных измерений представлена на рис. 3. Смещение поверхности измеряемого объекта  $h$  проявляется в смещении положения энергетического центра лазерного пятна в поле зрения фотоприёмного устройства  $\nu$ , которое и измеряется. Построенная по представленной на рис. 3 схеме триангуляционная ЛСИГП способна измерять лишь одну поступательную компоненту перемещений и работает по диффузной составляющей отражённого излучения.

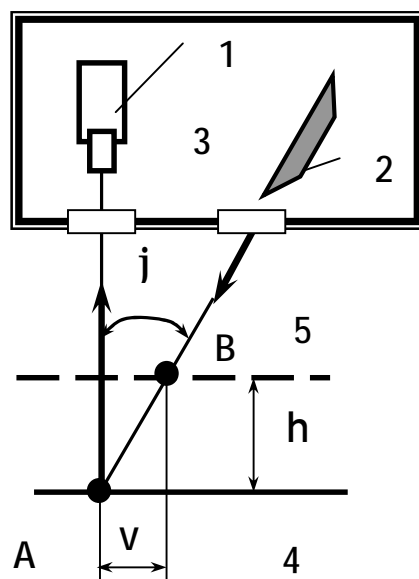


Рис. 3. Принцип триангуляционных лазерных систем измерения геометрических параметров:  
 1 – фотоприёмное устройство с многоэлементным фотоприёмником; 2 – лазер;  
 3 – триангуляционная ЛСИГП; 4 - начальное положение поверхности объекта; 5 – конечное положение поверхности объекта; А – начальное положение лазерного пятна на поверхности;  
 В – конечное положение пятна на поверхности;  $h$  – смещение поверхности;  $\nu$  – смещение лазерного пятна на поверхности;  $j$  – угол между оптическими осями фотоприёмного устройства и лазера

Основной вклад в относительную инструментальную погрешность вносит измерение координат энергетического центра пучка ( $D\nu / \nu$ ). Триангуляционные

датчики размеров, в частности белорусской фирмы ООО «РИФТЭК», имеют относительную погрешность измерений 0,1%, а разрешающую способность ещё на

порядок ниже – 0,01%, максимальную частоту обновления результатов измерения – 9,4 кГц, цифровой и аналоговый выходы. Таким образом, по погрешностям измерений триангуляционные датчики вполне сопоставимы с традиционными контактными измерительными инструментами типа линейек, штангенциркулей, микрометров, но по производительности и простоте сопряжения с ПЭВМ намного их превосходят.

Однако при воплощении триангуляционной схемы в реальную конструкцию следует учитывать скрещенность оптических осей лазера и фотоприёмного уст-

ройства и отклонение траектории перемещения изображения лазерного пучка от центральной линии фотоприёмной линейки. Рис. 4 демонстрирует преимущество структурированного лазерного пучка в форме отрезка по сравнению с традиционным коллимированным пучком.

Если в триангуляционной схеме использовать крестообразно структурированный пучок, то, как показано в работе [15], во-первых, при прочих равных условиях расширяется диапазон измеряемых перемещений  $h$  и, во-вторых, появляется возможность одновременного контроля ориентации объекта.

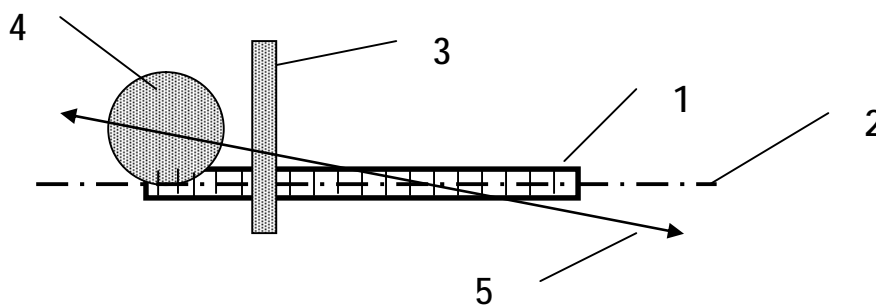


Рис. 4. Погрешности настройки триангуляционной ЛСИГП:

1 - фоточувствительная линейка; 2 - центровая линия линейки; 3 - структурированный лазерный пучок в форме отрезка; 4 - коллимированный лазерный пучок; 5 - траектория перемещения изображения лазерного пучка при смещении объекта измерения

Формированием структурированного лазерного пучка, форма которого в поперечном сечении моделируется отрезком прямой линии, а одно из продольных сечений представляет собой часть плоскости, ограниченной двумя пересекающимися прямыми («лазерная плоскость», «лазерный нож»), занимаются давно в связи разнообразными его применениями. В настоящее время подобную пространственную структуру пучка формирует встроенная в лазерные модули с полупроводниковыми лазерами оптика, причём изготовитель модулей гарантирует изгиб линии (отклонение от прямой в перпендикулярном сечении) на дистанции, например, в 10 м не более 1 мм. Такие модули производятся серийно, что делает их привлекательными для ЛСИГП, и носят на-

звание генераторов линий. Мощность излучения модулей варьируется от единиц до сотен милливатт.

Метод измерения формы поверхности с применением генераторов линий носит название светового сечения. В качестве примера плодотворного применения метода светового сечения и современной элементной базы для контроля размеров в двигателестроении можно привести результаты работ [16, 17], в которых описан прибор контроля профиля лопаток (ПКПЛ) газотурбинного двигателя – изделия массового производства.

Схема ПКПЛ представлена на рис. 5. Для получения двумерного изображения профиля лазерные осветители формируют узкие полосы с обеих сторон лопатки, которые, замыкаясь, очерчивают контур сече-

ния. Для контроля различных сечений лопатка перемещается посредством привода. Лазерный контур фокусируется объективом на матрицу ПЗС-камеры. Для повышения соотношения сигнал/шум применяется

спектральный интерференционный фильтр. Изображение, сформированное цифровой камерой, передаётся в ПЭВМ через высокоскоростной последовательный интерфейс.

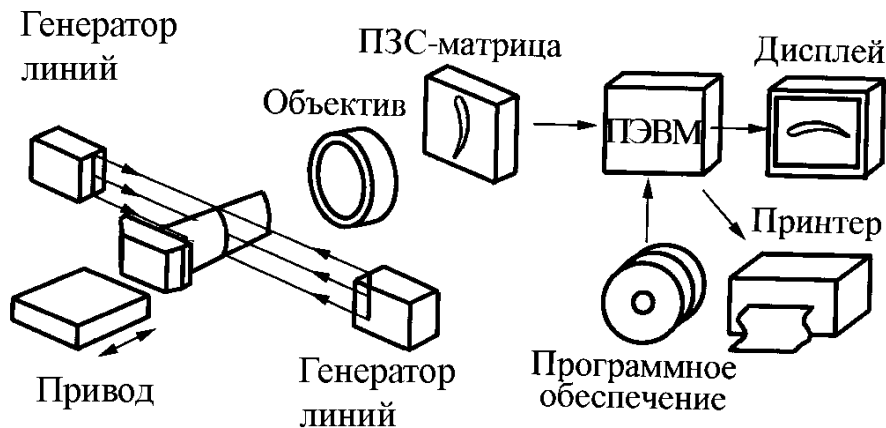


Рис. 5. Схема прибора контроля профиля лопаток

Параметры ПКПЛ таковы: быстродействие – 2 с/сечение; погрешность измерения линейных размеров - 0,01 мм; диапазон измерений по высоте - до 50 мм и длине - до 60 мм. Расширение диапазона измеряемых размеров возможно за счёт сменной оптики.

### Проблемы внедрения ЛСИГП и их решение

При применении дистанционных бесконтактных методов измерений, основанных на взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью измеряемого изделия, необходимо принимать во внимание как кривизну и наклон поверхности к падающему лучу [18], так и её оптические свойства [19], учитывая современную тенденцию в работе непосредственно по эксплуатационным поверхностям контролируемых изделий без применения специальных марок и навесных оптических элементов. Поскольку высокие значения коэффициента отражения поверхности измеряемого объекта способствуют полной реализации метрологического потенциала ЛСИГП, то на нерабочие поверхности контролируемых изделий,

например режущего инструмента, полезно нанесение покрытия с высоким коэффициентом отражения. Операции нанесения таких покрытий должны быть предусмотрены при конструкторской и технологической проработке проекта и найти отражение в соответствующей документации, т.е. процедура использования ЛСИГП должна закладываться в проекте изначально.

Ослабление влияния наклона и кривизны поверхности на погрешности измерений геометрических параметров достигается оптимизацией оптических схем измерения, которые должны конструироваться так, чтобы углы падения зондирующего излучения на объект измерения были близки к нормальным. Влияние эффекта изменения фазы волны отражающим материалом на результаты измерения формы поверхности оценивается авторами [19] величиной, не превышающей 100 нм, что на 1...2 порядка меньше допусков, принятых при проведении подавляющего большинства измерений размеров в машиностроении.

В условиях производственных помещений значение вертикального градиента температуры воздушного тракта мо-

жет достигать 10 К/м [20], что вызывает искривление траектории распространения излучения, а вместе с этим и погрешности угловых и дальномерных измерений. Поэтому контроль геометрии объектов, сосредоточенных в пространстве и находящихся на удалении от устройства контроля при излучении, распространяющемся в приземном слое открытой атмосферы, требует исследования температурных условий в помещениях, где производится контроль изделий, и устранения температурных градиентов.

В подтверждение этого произведём оценку углового отклонения  $\alpha_{\text{град}}$  оптической оси лазерного пучка от своего начального положения при прохождении атмосферной трассы протяжённостью  $l$  с градиентом температур, перпендикулярным начальному положению оптической оси, с использованием выражения, приведённого в работе [20]:

$$\alpha_{\text{град}} \approx \text{tg} \alpha_{\text{град}} = [l(n-1) | \text{grad } T |] / T, \quad (1)$$

где  $n$  – среднее значение показателя преломления вдоль трассы;  $T$  – температура. При значениях  $\dot{\text{grad}} T = 10$  К/м,  $l = 10$  м;  $T = 300$  К и, согласно [21],  $(n-1) = 0,00028$  получим угловое отклонение  $\alpha_{\text{град}} = 19''$ , которое пересчитывается в линейное отклонение, например, позиционирования как  $(\alpha_{\text{град}} l) \approx 1$  мм.

Наряду с плавными изменениями показателя преломления на трассах экспериментально наблюдаются и резкие скачки температур в 2...3 К, а вместе с ними и показателя преломления [22]. Модель с резким скачком показателя преломления при неблагоприятном расположении границы температурных или барических зон по отношению к траектории пучка даёт большие значения углов отклонения, чем модель с постоянным градиентом, и поэтому также должна быть введена в рассмотрение. Для приближённых числовых оценок угла отклонения траектории от начального направления, вызванного взаимодействием с неблагоприятно ориентированной границей, предложено простое выражение [23], при выводе которого

предполагалось, что скачок показателя преломления для нормальных, в среднем, условий обусловлен лишь скачком температуры  $DT$ :

$$\alpha_{\text{скач}} = (1,41 \cdot 10^{-3} (\text{рад/К}^{1/2})) \sqrt{\Delta T} = (291 (\text{угл.с/К}^{1/2})) \sqrt{\Delta T}. \quad (2)$$

Разность температур всего в 0,1 К может приводить при неблагоприятном положении границы областей с разными показателями преломления к отклонениям пучка на единицы угловых минут ( $\alpha_{\text{скач}} \approx 1,5'$  при  $DT = 0,1$  К). Неблагоприятная геометрия в расположении траектории пучка и границы раздела может реализовываться, когда лазерный пучок распространяется вблизи нагретой панели прибора, теплового экрана и т.п. При этом возможны неоднородные отклонения различных зон в поперечном сечении пучка и перераспределение плотности мощности по сечению, т.е. к искажению формы пучка.

Преодолеваются и чисто формальные препятствия на пути применения ЛСИГП – недостаточно развитая нормативная база. Здесь попутно с разработкой собственно прибора приходится создавать и узаконивать методику его аттестационных испытаний, основное содержание которых сводится к сравнению результатов измерений геометрического параметра разработанным прибором и по стандартной, чаще всего контактной методике. Практика внедрения подобных приборов показывает, что это формальное препятствие вполне преодолимо, т.к. практическая метрология предлагает аттестованные по геометрическим параметрам наборы контрольных образцов [24]. Так, разработанные во ВНИИМС ступенчатые меры толщины покрытий и концевые меры перекрывают диапазон от  $10^{-1}$  до  $10^5$  мкм и позволяют получить экспериментальную оценку погрешности большинства описанных выше ЛСИГП.

Предлагаются специальные одно-, дву- и трехмерные эталоны, предназначенные для калибровки координатно-измерительных машин, представление о которых можно получить на примере про-



дукции германской фирмы КОВА. Эталонная мера КОВА sphere beam представляет собой калиброванную линейку с закреплёнными на ней с известной периодичностью керамическими сферами, стандартные размеры от 1500 до 2500 мм. Калибровочная плита со сферами КОВА – Check (двумерный эталон) имеет стандартные размеры от 230 × 230 × 24 мм до 620 × 620 × 24 мм и разброс расстояний между центрами сфер < 0,3 мкм. Трёхмерный эталон - Ball Cube КОВА – Q3 представляет собой ферменную конструкцию в форме куба с закреплёнными в вершинах сферами и имеет номинальные размеры от 300 × 300 × 300 мм до 600 × 600 × 600 мм. Существуют и прототипы разработок методик аттестации ЛСИГП [25].

### Заключение

Таким образом, можно говорить о становлении нового класса измерительной техники, неотъемлемыми компонентами которой являются формователи цифровых изображений структурированных лазерных пучков, а измеряемые геометрические параметры изделий получаются в результате их обработки. Процесс становления связан с преодолением многочисленных противоречий методологического, метрологического и технического характера. Например, использование матричного фотоприёмника с большим числом элементов снижает погрешность координатных измерений, но увеличивается поток обрабатываемой информации и снижается быстродействие. Разрешение указанного противоречия достигается использованием алгоритмов субэлементного разрешения, априорных знаний об измеряемом объекте и переходом от обработки площадей к обработке контуров, т.е. к снижению размерности задачи.

Эффективность применения ЛСИГП многократно возрастает, если оно закладывается ещё на стадии проектирования потенциального объекта измерений и отражается в конструкторской и технологической документации. Это находит прояв-

ление в специальных посадочных местах для установки световозвращателей и других оптических элементов, использовании оптических покрытий с заданными свойствами, стабилизации и контроле параметров атмосферы и вибрационного фона в помещении, где предполагается развертывание ЛСИГП и т.п.

### Библиографический список

1. Полетаев, В. А. Технологическая оснастка для контроля проточной части лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В. А. Полетаев. // Контроль. Диагностика. – 2008. - № 12. – С. 19 – 21.
2. Каракулев, Ю. А. Измерение отклонения от соосности деталей в регулировочных клапанах турбин [Текст] / Ю. А. Каракулев. // Изв. вузов. Приборостроение. - 2007. - № 4. – С. 27 – 30.
3. Технология сборки и испытаний космических аппаратов [Текст] / под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. // М.: Машиностроение, 1990.- 352 с.
4. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [Текст] / А. Н. Кирилин, Г. П. Аншаков, Р. Н. Ахметов [и др.] // Самара: АГНИ, 2011. – 280 с.
5. Вагнер, Е. Т. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер, А. А. Митрофанов, В. Н. Барков. // – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.
6. Вагнер, Е. Т. Лазеры в самолетостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер. - М.: Машиностроение, 1982. - 184 с.
7. Григорьев, С. Н. Проблемы измерения в технологических процессах формообразования [Текст] / С. Н. Григорьев, В. И. Телешевский. // Измерительная техника. – 2011. - №7. – С. 3 – 7.
8. Джонс, Б. Программа JSF – пример высокого профессионализма [Текст] / Б. Джонс. // Контроль. Диагностика. – 2005. - № 9. – С. 69 – 72.
9. Ткачев, К. Н. Лазерная координатно-измерительная система FARO Laser

Tracker [Текст] / К. Н. Ткачев // Контроль. Диагностика. – 2006. - № 12. – С. 59 – 61.

10. Барвинок, В. А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов [Текст] / под ред. В. А. Барвинка. - М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

11. Дёмкин, В. Н. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы (обзор) [Текст] / В. Н. Дёмкин, В. Е. Привалов. // Вестн. СПбО АИН. Вып. 5. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – С. 138 – 187.

12. Катус, Г. П. Обработка визуальной информации [Текст] / Г. П. Катус. - М.: Машиностроение, 1990. - 320 с.

13. Метод спекл-интерферометрии для определения теплового расширения наноматериалов [Текст] / Т. А. Компан, А. С. Корнеев, Н. Ф. Пухов [и др.] // Измерительная техника. – 2011. - № 4. – С. 48 – 52.

14. Гришанов, А. В. Многокомпонентный лазерный измеритель виброперемещений [Текст] / А. В. Гришанов, В. Н. Гришанов. // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 19-й международ. конф. – СПб.: СПбГПУ, 2009. – С. 400 – 410.

15. Гришанов, А. В. Крестообразная структура сечения лазерного пучка для измерения дальности и ориентации изделий [Текст] / А. В. Гришанов, В. Н. Гришанов. // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 20-й международ. конф. – Т.1. – СПб.: СПбГПУ, 2010. – С. 120 - 131.

16. Кеткович, А. А. Лазерная компьютерная система контроля профиля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 [Текст] / А. А. Кеткович, Н. И. Яковлева, Б. А. Чичигин. // Контроль. Диагностика. – 2007. - № 3. – С. 32 – 34.

17. Кеткович, А. А. Лазерный профилометр объектов сложной формы [Текст] / А. А. Кеткович, Б. А. Чичигин. // Фотоника. – 2009. - № 3. – С. 30 – 33.

18. Вертопрахов, В. В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений [Текст] / В. В. Вертопрахов. // Автометрия. - 1995. - № 6. - С. 64 - 68.

19. Минаев, В. Л. Влияние эффекта изменения фазы отражённой волны на измерения формы поверхности в оптической профилометрии [Текст] / В. Л. Минаев, К. Е. Лоцилов. // Измерительная техника, 2010. - № 7. – С. 36 – 38.

20. Араканцев, К. Г. Физическое моделирование двухволнового метода измерений в авторефлексионной оптико-электронной системе контроля смещений [Текст] / К. Г. Араканцев, А. Н. Тимофеев. // Оптический журнал, 2009. - № 1. – С. 9 – 12.

21. Физические величины [Текст]: справочник / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. // М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.

22. Мищенко, И. А. Исследование температурных режимов горизонтальных трасс приземного слоя атмосферы [Текст] / И. А. Мищенко, А. М. Андрусенко. // Измерительная техника. - 1990. - № 11. - С. 35-36.

23. Гришанов, В. Н. Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения. Ч.1 [Текст] / В. Н. Гришанов, В. И. Мордасов. - Самара: Изд-во СГАУ, 1995.- 121 с.

24. Бабаджанов, Л. С. Метрологическое обеспечение измерений геометрических параметров изделий методами неразрушающего контроля [Текст] / Л. С. Бабаджанов, М. Л. Бабаджанова. // Измерительная техника, 2010. - № 11. – С. 22 – 24.

25. Травкин, С. В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Травкин. - М.: МИИГАиК, 2007. - 22 с.

## UP-TO-DATE LASER MEASURING SYSTEMS IN THE PRODUCTION CYCLE OF SPACE TECHNIQUE

©2012 V. N. Grishanov<sup>1</sup>, A. A. Oynonen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>Central Specialized Design Bureau "CSDB-Progress"

The paper deals with up-to-date methods of controlling the geometry of products using laser measuring systems. The basic principles of measuring and examples of devices implementing them are described. The advantages of laser measuring systems over contract ones are shown. The difficulties arising in the integration of laser measuring systems into the production chain of the plant are analyzed and the ways of overcoming them are planned.

*Laser geometry control, contactless measurements, cliché, laser tracker, large-dimensioned object.*

### Информация об авторах

**Гришанов Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vladgrishanov@yandex.ru](mailto:vladgrishanov@yandex.ru). Область научных интересов: бесконтактные дистанционные измерения оптическими методами.

**Ойнонен Андрей Алексеевич**, инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». E-mail: [Grand\\_forever@inbox.ru](mailto:Grand_forever@inbox.ru). Область научных интересов: бесконтактные дистанционные измерения оптическими методами.

**Grishanov Vladimir Nikolaevich**, candidate of technical science, senior lecturer of the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: [vladgrishanov@yandex.ru](mailto:vladgrishanov@yandex.ru). Area of research: contactless remote measurements by optical methods.

**Oynonen Andrey Alekseevich**, engineer-designer of Central Specialized Design Bureau. E-mail: [Grand\\_forever@inbox.ru](mailto:Grand_forever@inbox.ru). Area of research: contactless remote measurements by optical methods.

УДК 621.438

## АППРОКСИМАТИВНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО - СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ

©2012 С. А. Прохоров<sup>1</sup>, С. А. Ильинский<sup>2</sup>, Т. Г. Александрова<sup>2</sup>, Я. В. Соловьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)  
<sup>2</sup>ОАО «Кузнецов», г. Самара

Приводятся и анализируются результаты определения диагностических параметров камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), полученные при помощи автоматизированной системы аппроксимативного корреляционно-спектрального анализа в ортогональном базисе Бесселя путём получения моделей корреляционных и спектральных характеристик исходных массивов значений температур.

*Камера сгорания, спектр, корреляционная функция, аппроксимация, коэффициент корреляции.*

### Введение

Семейство двигателей НК в процессе своей эволюции, модернизации и разработки сменило несколько вариантов конструкции камер сгорания (КС).

На рис. 1 отображены основные этапы эволюции конструкции камер сгорания газотурбинных установок (ГТУ) семейства НК [1].

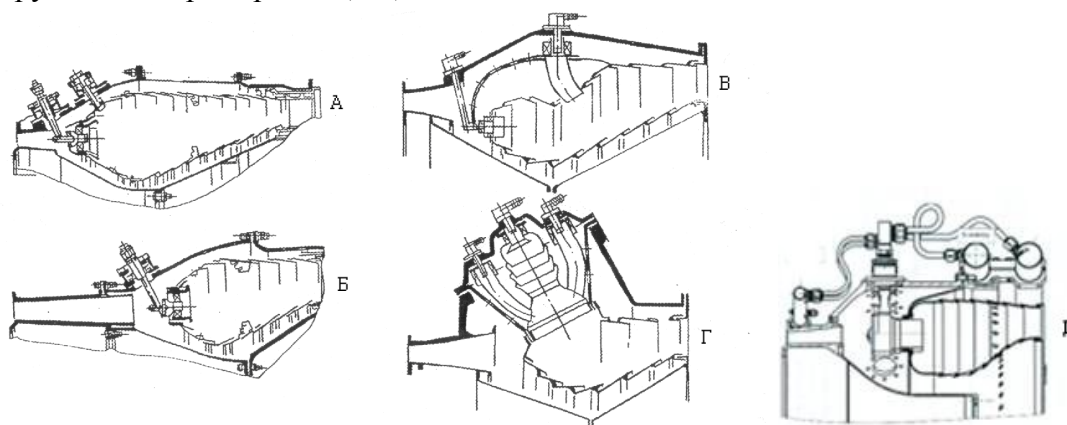


Рис. 1. Эволюция развития КС ГТУ семейства НК:

*А - традиционная схема; Б - короткая традиционная схема; В - двухзонная кольцевая; Г - двухзонная с выносными жаровыми трубами; Д - двухзонная малоэмиссионная*

В настоящее время используются три конструкции: В, Г, Д, ведутся работы по проектированию новых высокоэффективных и высокотехнологичных КС. Рассмотрим и сравним эти три конструкции камеры сгорания с целью оценки и анализа равномерности поля температур в её выходном сечении.

Традиционно в соответствии с техническими условиями (ТУ) на испытание для решения этой задачи применяется следующая методика:

- создаются определённые условия на входе в камеру сгорания;
- на выходе, на срезе камеры сгорания, устанавливается специальный измерительный инструмент – гребёнка с 6-ю термопарами;
- гребёнка движется по окружности, перемещаясь из одного положения в другое.

Угол смещения гребёнки составляет 2,5°. Количество точек измерения за один оборот гребёнки – 140.

Гребёнка перемещается из одного положения в другое за 2 с, а в точке измерения задерживается на 16 с для устранения влияния инерционности гребенки. Измерение происходит в конце интервала задержки. В результате испытания получается массив значений температур, характеризующий стационарную неравномерность температурного поля по окружности и в радиальном направлении [1].

На основе этих данных определяется средняя температура по измеряемым поясам камеры сгорания:

$$T_{\kappa} = \frac{\sum T_{ki}}{140}, \quad (1)$$

где  $T_{ki}$  – значение температуры в  $i$ -й точке  $k$ -го пояса.

Пояс (радиус) – массив значений температур, измеренных одной термопарой. Всего в КС 6 поясов, а первый пояс находится около внутренней оболочки КС.

Значения  $T_{\kappa}$ , взятые в относительных единицах, определяют эпюру температурного поля, представленную на рис. 2.

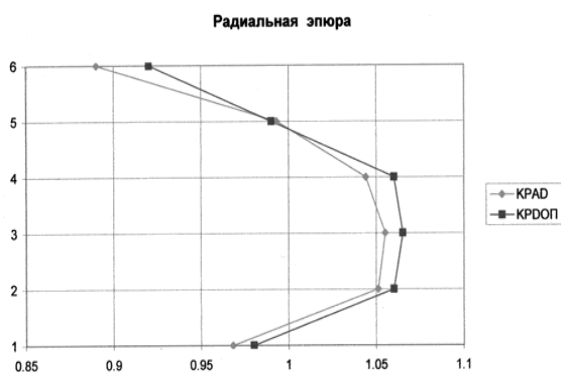


Рис. 2. Эпюра температурного поля: КРАД – относительный коэффициент радиальной эпюры; КРДОП – относительный коэффициент радиальной эпюры допустимый

Далее рассчитывается среднемассовая температура КС:

$$T_{\text{м}} = \frac{\sum T_{\kappa}}{6}. \quad (2)$$

Эпюра и окружная неравномерность на радиусах относительно среднемассовой температуры являются основными параметрами как при оценке КС,

так и при оценке эффективности проведенных мероприятий.

Данная работа, используя полученный в процессе испытаний массив значений температур, позволяет расширить количество параметров, определяющих качество КС, а также связать параметры неравномерности температурного поля с конструкцией КС и её конструктивными элементами.

Предлагается ввести в оценку параметров камеры сгорания:

- автокорреляционную (АКФ)  $T_{ki}$  и взаимно корреляционную функции (ВКФ) между  $T_{ki}$  и  $T_{ni}$ ;
- среднее квадратическое отклонение (СКО) значений температур в поясе;
- коэффициенты корреляции  $T_{ki}$  и  $T_{ni}$ ;
- спектр распределения значений температур в поясах.

Следует отметить, что корреляционный и спектральный анализ проводится для небольшого количества точек измерения: для 6 термопар и 140 позиций измерения. Для повышения точности и разрешения оценки характеристик выходного тракта КС можно установить в радиальном направлении 8 термопар, а количество позиций увеличить до 350-400.

Расчёты и построение графиков в данной работе производились при помощи автоматизированной системы аппроксимативного корреляционно-спектрального анализа в ортогональном базисе Бесселя, подробное описание которой приведено [2].

Для оценки корреляционно-спектральных характеристик параметров камеры сгорания предлагаемая методика содержит следующие этапы [3]:

- 1) центрирование результатов измерения температуры  $T_{ki}$  с использованием ортогональных полиномов;
- 2) оценку корреляционной (взаимной корреляционной) функции  $T_{ki}$  ( $T_{ki}, T_{ni}$ ) и коэффициентов корреляции;

3) аппроксимацию корреляционной (взаимной корреляционной) функции ортогональными функциями Бесселя;

4) оценку спектральной плотности мощности  $T_{ki}$  по параметрам ортогональных разложений корреляционной (взаимной корреляционной) функции в базисе Бесселя.

Рассмотрим подробно особенности реализации каждого этапа.

### Этап 1

В результате эксперимента получена совокупность  $\{T_{ki}(\alpha_i)\}_{i=1...140, k=1...6}$ ,

где  $\alpha_i$  - угол смещения гребёнки.

Результаты эксперимента в общем случае представляют собой нестационарный ряд (рис. 3), его математическое ожидание является функцией угла  $\hat{T}(\alpha)$ :

$$\hat{m}_{Tk}(\alpha_i) = \sum_{n=0}^m b_{kn} \psi_n(\alpha_i),$$

где  $\psi_n(\alpha_i)$  - ортогональные полиномы (в данной системе используются ортогональные полиномы Лежандра, Чебышева, Лагерра);  $\beta_{kn}$  - коэффициенты разложения в ряд.

Для центрирования нестационарного ряда применим аппроксимативный подход [3]. В этом случае центрированную реализацию ряда представим в виде:

$$\hat{T}_{ki}(\alpha_i) = T_{ki}(\alpha_i) - \hat{m}_{Tk}(\alpha_i).$$

### Этап 2

Оценка авто- и взаимной корреляционной функции производится по формулам:

$$\begin{cases} \hat{K}_{Tj}(J) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{T}_{ji} \hat{T}_{j,i+J}, \\ \hat{K}_{Tjn}(J) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{T}_{ji} \hat{T}_{n,i+J}, \\ \hat{K}_{Tnj}(J) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \hat{T}_{ni} \hat{T}_{j,i+J}. \end{cases}$$

### Этап 3

Аппроксимативный корреляционный анализ проводится с использованием ортогональных функций Бесселя [2].

При построении аппроксимативной модели ВКФ необходимо аппроксимировать как правую, так и левую ветви взаимной корреляционной функции, то есть необходимо искать модель в виде:

$$K_{TjTn}(t) = S_{Tj} S_{Tn} \left[ \sum_{k=0}^{m1} b_{k,n} \cdot Jf_k(n, t, g_1) \cdot l(t) + \sum_{k=0}^{m2} b_{k,n} \cdot Jf_k(n, -t, g_2) \cdot l(-t) \right],$$

где  $b_{k,n}$  и  $b_{k,l}$  - коэффициенты правой и левой ветвей модели ВКФ:

$$b_k = b_k + C_k,$$

$$b_k = \frac{1}{\|Jf_k(n, g)\|^2} \int_0^\infty K_x(t) \cdot Jf_k(n, t, g) \cdot m(t, g) dt,$$

$$C_k = \frac{1}{\|Jf_k(n, g)\|^2} \cdot \left( 1 - \sum_{s=0}^m b(s) \right) / \sum_{s=0}^m \frac{1}{\|Jf_s(n, g)\|^2},$$

$$l(t) = \begin{cases} 1, t > 0 \\ 1/2, t = 0 \\ 0, t < 0 \end{cases} \text{ и } l(-t) = \begin{cases} 0, t > 0 \\ 1/2, t = 0 \\ 1, t < 0 \end{cases}$$

$g_1$  и  $g_2$  - параметры масштаба правой и левой ветвей модели ВКФ;

$m1$  и  $m2$  - число членов разложения ряда для правой и левой ветвей модели ВКФ;

$Jf_k(n, t, g)$  - ортогональные функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

$$Jf_k(n, t, g) = J_n \left[ I_k^{(n)} \cdot (1 - e^{-g \cdot t}) \right] \cdot e^{-g \cdot t}.$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:  $r_{TjTn} = \frac{K_{TjTn}(0)}{\sigma_{Tj} \sigma_{Tn}}$ .

### Этап 4 (5)

Определив параметры аппроксимативной модели корреляционной функции, оценим спектральную плотность мощности (СПМ) по следующей формуле [3]:

$$S_{Tn}(w) = \frac{S_{Tj} S_{Tn}}{2p} \left[ \sum_{k=0}^{m1} b_{k,n} \operatorname{Re} W_k(jw) + \sum_{k=0}^{m2} b_{k,n} \operatorname{Re} W_k(jw) \right]$$

Здесь  $W_k(jw)$  - преобразование Фурье ортогональных функций Бесселя:

$$W_k(jw) = \frac{1}{g + jw} \cdot \left( 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \prod_{i=0}^n a_i \right),$$

$$\text{где } a_i = \frac{(-1)(kmm_k)^2 \frac{1}{i+1} \left( \frac{1}{2} + i \right)}{\left( \frac{3g + jw}{2g} + 2i \right) \left( 1 + \frac{3g + jw}{2g} + 2i \right)}$$

Рассмотрим особенности применения предлагаемой методики для анализа КС.

### 1. Двухзонная КС с выносными жаровыми трубами (вариант Г)

В камере сгорания установлены 11 равномерно расположенных по окружности головок (горелок) с общим газосборником. Количество отверстий для подачи топливовоздушной смеси с избытком воздуха (больших) – 44. Отверстия расположены по 4 на каждой головке КС.

Был проведен расчёт среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma$  и математического ожидания (МО), взаимной корреляционной, автокорреляционной функции и спектра для нескольких испытаний КС.

### Расчёт $\sigma$

Из табл. 1 видно, что разброс значений температуры в поясах велик и составляет 160-172 °С.

График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант Г) по поясам представлен на рис. 3.

Таблица 1. Результаты расчёта СКО и МО значений температуры по поясам камеры сгорания (вариант Г)

Пояс	1	2	3	4	5	6
$\sigma$	163	165	172	160	163	161
МО	734	821	817	781	788	684

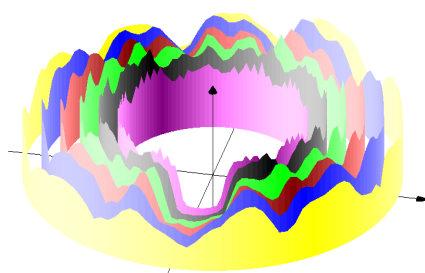


Рис. 3. График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант Г) по поясам

### Корреляционный анализ

На рис. 4 приведены результаты определения автокорреляционной функции по поясам. Характер поведения автокорреляционной функции в данном случае (рис. 4) говорит о значительной величине гармонической составляющей процесса. Особенно это заметно по 6-му поясу.

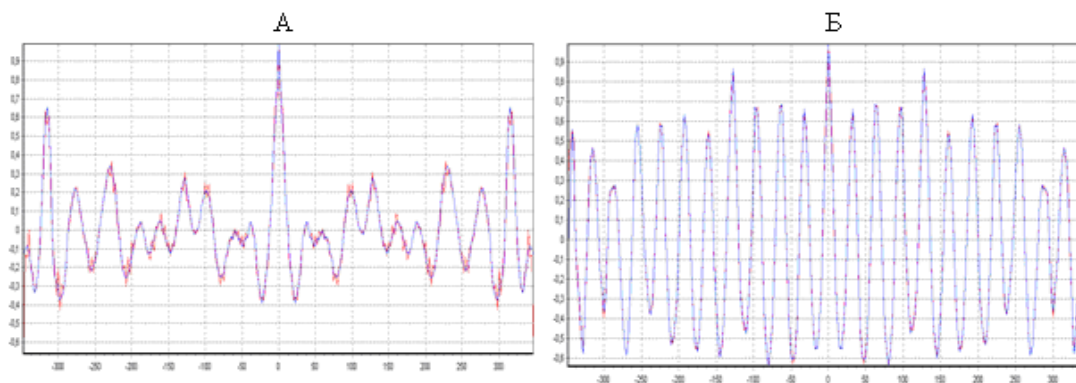


Рис. 4. АКФ по результатам испытания КС (вариант Г): А – 1-й пояс (температура T4-1); Б – 6-й пояс (температура T4-6)

### Взаимный корреляционный анализ

В общем случае приходится изучать взаимодействие двух процессов с различными масштабами измерения или с различными дисперсиями.

В таком случае необходимо определять взаимную корреляционную функцию.

Определим ВКФ для поясов КС: 1-го пояса со 2-м, 3-м и т.д.

Рассчитаем коэффициенты корреляции для ВКФ между поясами температурного поля, которые показывают степень взаимовлияния газовых потоков в поясах КС между собой.

На рис. 5 показаны коэффициенты корреляции между  $i$ -ми и  $j$ -ми поясами ( $i = \overline{1,6}, j = \overline{1,6}$ ), по оси абсцисс указан номер пояса, по оси ординат – количественное значение коэффициента корреляции.

Так, например, пояса 1, 5 и 6 практически взаимонезависимы (не коррелированы). Коэффициент корреляции меньше 0,3. Это говорит о неоднородности потоков в зоне горения (недостаточное смешивание).

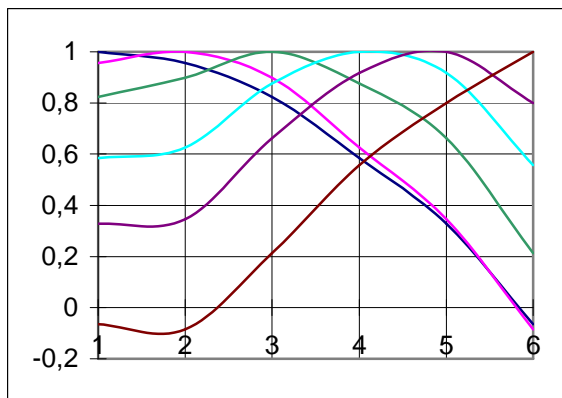


Рис. 5. Коэффициенты корреляции между поясами T4-I - T4-j камеры сгорания (вариант Г)

### Спектральный анализ

Проведём спектральный анализ массива показаний температур на предмет выявления гармонической составляющей процесса, замеченной при анализе АКФ и ВКФ.

Спектральный анализ будем проводить по поясам массива данных.

При этом получим составляющие спектра и их величины. В отношении физического смысла слова «частота» можно сказать, что это частота появления объекта, искажающего температурное поле.

Это могут быть горелки, отверстия подачи воздуха, затеняющие трубы, не горящие горелки, плохо настроенные форсунки, карбюраторы и др. [3].

По оси  $Y$  – температура в  $^{\circ}\text{C}$ , по оси  $X$  – частота процесса в относительных единицах, которые могут быть пересчитаны в Гц по формуле:  $F(\text{Гц}) = n * 140$ , где  $n$  – показания по оси  $X$ .

На рис. 6 видны три максимума.

По 6 поясу:

- на частоте примерно 1 Гц амплитуда около  $90^{\circ}\text{C}$ ;
- на частоте примерно 11 Гц амплитуда около  $170^{\circ}\text{C}$ ;
- на частоте примерно 22 Гц амплитуда около  $90^{\circ}\text{C}$ .

Аналогичная картина, но с меньшей амплитудой, по 1-му поясу.

Таким образом, влияние конструкции более сказывается около внешней оболочки, чем около внутренней.

Наличие всех трёх частот объясняется конструктивными особенностями и дефектом на данном экземпляре КС.

Дело в том, что на данном испытании КС появился дефект – не зажглась одна жаровая труба, в результате на графике физического процесса появился провал по уровню температуры и в спектре появилась частота 1 Гц.

Частота 11 Гц полностью соответствует числу жаровых труб – 11 шт. Причём амплитуда этой частоты довольно велика –  $170^{\circ}\text{C}$ . Здесь видно явное отрицательное влияние конструкции на равномерность температурного поля. Частота 22 Гц – это удвоенная частота 11 Гц.

Отверстия для подачи смеси воздуха в КС на спектре не проявляются, так как они расположены на жаровой трубе и вносят свой вклад в неравномерность температурного поля вместе с жаровой трубой.



Наибольшая неравномерность наблюдается на 6-м поясе, находящемся у внешней оболочки. Амплитуда частоты 11 Гц здесь достигает 170°С.

Наличие гармонической частоты 11 Гц в массиве данных по температурному полю свидетельствует о влиянии кон-

струкции КС, которое трудно будет устранить при жёстких требованиях к габаритам КС. Уменьшение влияния конструктивных элементов (горелок) на равномерность температурного поля можно достичь увеличением их числа до оптимального предела.

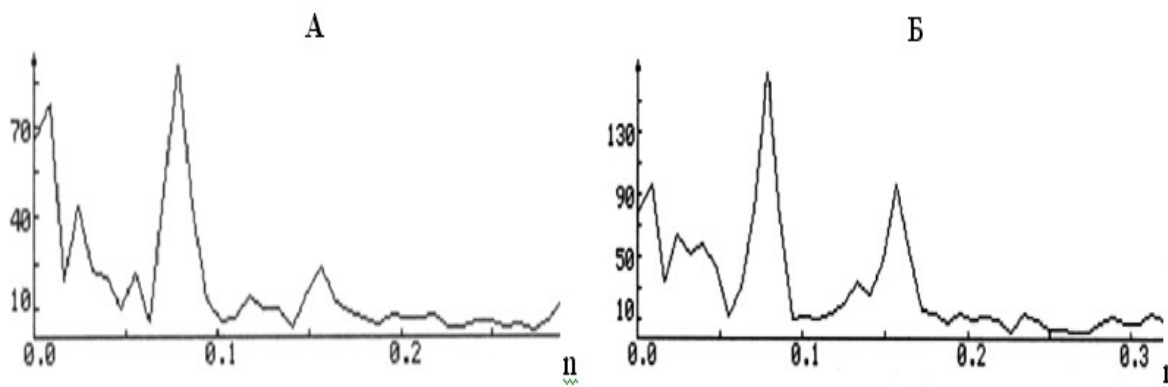


Рис. 6. Спектральный анализ по поясам КС (вариант Г): А – спектр по 1-му поясу; Б – спектр по 6-му поясу

## 2. Двухзонная кольцевая КС (вариант В)

Проведём анализ результатов оценки параметров КС другой конструкции: двухзонной кольцевой.

Двухзонная кольцевая КС состоит из двух контуров горения: первый контур - внутренний (дежурная зона) и второй контур (основная зона). В первом контуре – 28 горелок, во втором контуре – 42 горелки.

Также был проведён расчёт  $\sigma$  взаимной корреляционной, автокорреляционной функции и спектра для нескольких испытаний КС.

### Расчёт $\sigma$

Из табл. 2 видно, что разброс значений температуры в поясах значительно меньше, чем в камере сгорания Г, и составляет 42-63 °С. Это свидетельствует о лучшей равномерности поля температур, а если применить технологический термин, то меньшей «шероховатости» температурного поля КС.

График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант В) по поясам представлен на рис. 7.

Таблица 2. Результаты расчёта СКО и МО значений температуры по поясам камеры сгорания (вариант В)

Пояс	1	2	3	4	5	6
$\sigma$	42	47	47	51	60	63
МО	746	845	847	834	783	697

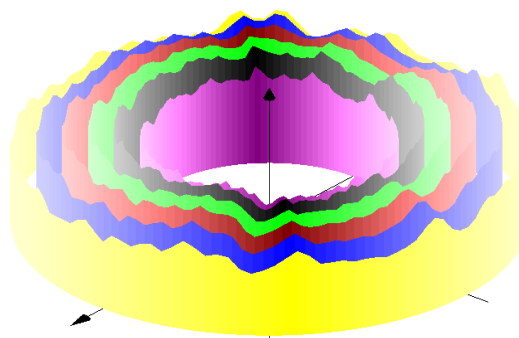


Рис. 7. График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант В) по поясам

### Корреляционный анализ

Проведём расчёт автокорреляционной функции по результатам испытания КС варианта В. Вид АКФ по поясам примерно одинаков и различается мало (рис. 8). В процессе имеются гармонические составляющие.

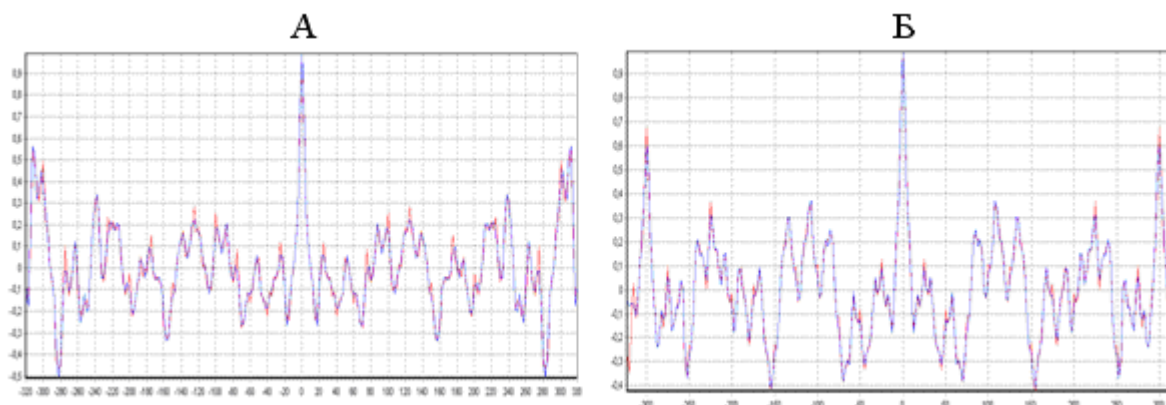


Рис. 8. АКФ по результатам испытания КС (вариант В):  
А – 1-й пояс (температура Т4-1); Б – 6-й пояс (температура Т4-6)

### Взаимный корреляционный анализ

На рис. 9 приведены графики коэффициентов корреляции для ВКФ экспериментальной КС варианта В.

ВКФ рассчитывалась для оценки взаимовлияния газовых потоков, описываемых массивами данных по поясам температурного поля.

Из рис. 10 видно, что уровень корреляции процессов по поясам высокий. Процессы взаимозависимы. Причём даже удалённые пояса имеют коэффициент корреляции на уровне 0,4–0,5. Это свидетельствует о хорошем смешении и однородности потоков газа.

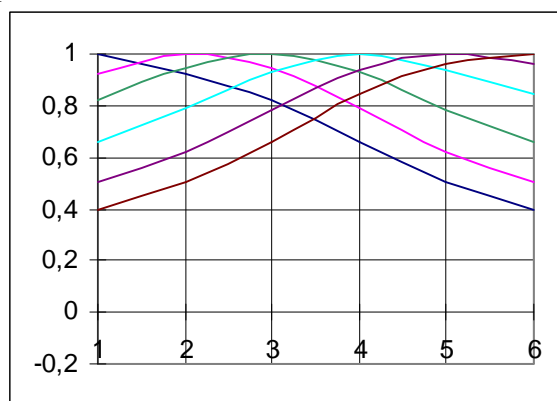


Рис. 9. Коэффициенты корреляции между поясами Т4-1 - Т4-*j* камеры сгорания (вариант В)

### Спектральный анализ

Проведём спектральный анализ массива показаний температур КС варианта В на предмет выявления гармонической со-

ставляющей процесса, замеченной при анализе АКФ.

По сравнению с данными по КС варианта Г амплитуда частот гораздо ниже и составляет 40-50 °С против 170 °С на 6-м поясе КС варианта В.

На графике (рис. 10) несколько максимумов, соответствующих:

- низким частотам 2 Гц (соответствует двум запальникам), 7 Гц (минимальное кратное число для горелок первого и второго контуров) и 12 Гц;
- частотам - 28, 42, 56 Гц.

Данная КС характеризуется довольно значительной амплитудой низких частот по сравнению с частотами 28, 42, 56 Гц. Низкие частоты говорят, например, об отличии в настройке горелок по расходам топлива и воздуха или об отличии местных условий в КС.

Частоты 28 и 42 Гц - это проявления воздействия на температурное поле горелок 1-го и 2-го контуров, они соответствуют количеству горелок в контурах. Амплитуды этих частот небольшие.

Частота 56 Гц соответствует удвоенной частоте 28 Гц (28 горелок 1-го контура), а также 56 отверстиям ввода воздуха на внутреннем кожухе жаровой трубы.

Идеальным случаем является тот, когда на температурном поле вообще не проявляются частоты, эквивалентные количеству механических узлов, участвующих в формировании горения.

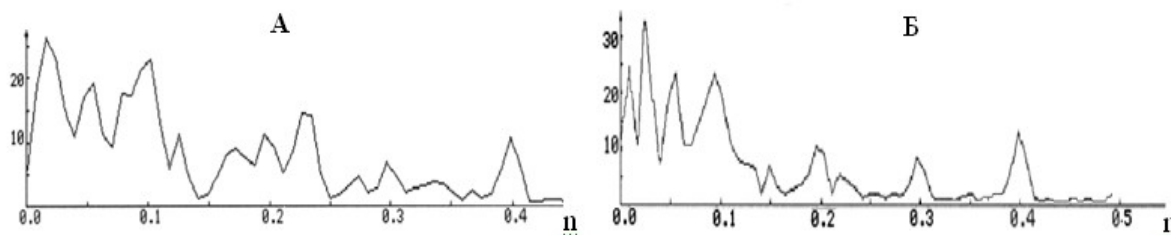


Рис. 10. Спектральный анализ по поясам КС (вариант В):  
А – спектр по 1-му поясу; Б – спектр по 3-му поясу

### 3. Малоэмиссионная КС (вариант Д)

Проведём анализ результатов оценки параметров КС варианта Д.

Малоэмиссионная КС состоит из двух контуров горения: обе зоны горения организованы во внутреннем контуре. Здесь установлены 28 двухкомпонентных горелок.

Был проведен расчёт  $\sigma$  взаимной корреляционной, автокорреляционной функции и спектра для одного испытания КС.

#### Расчёт $\sigma$

Из табл. 3 видно, что разброс значений температуры в поясах меньше и составляет 28-57 °С.

Таблица 3. Результаты расчёта СКО и МО значений температуры по поясам камеры сгорания (вариант Д)

Пояс	1	2	3	4	5	6
$\sigma$	28	37	42	43	48	57
МО	741	788	778	767	756	749

Это свидетельствует о хорошей равномерности поля температур, а если при-

менить технологический термин, то малой величине «шероховатости» температурного поля КС.

График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант Д) по поясам представлен на рис. 11.

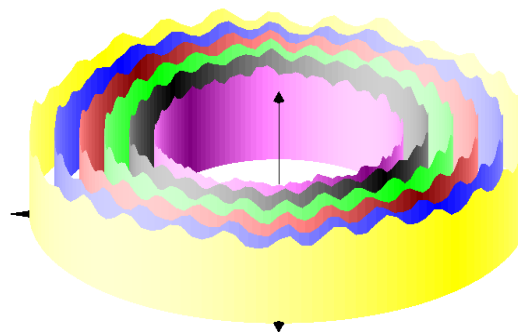


Рис. 11. График окружной неравномерности температурного поля КС (вариант Д) по поясам

#### Корреляционный анализ

Проведём расчёт автокорреляционной функции по результатам испытания КС.

Вид АКФ (рис. 12) говорит о наличии в процессе гармонической составляющей.

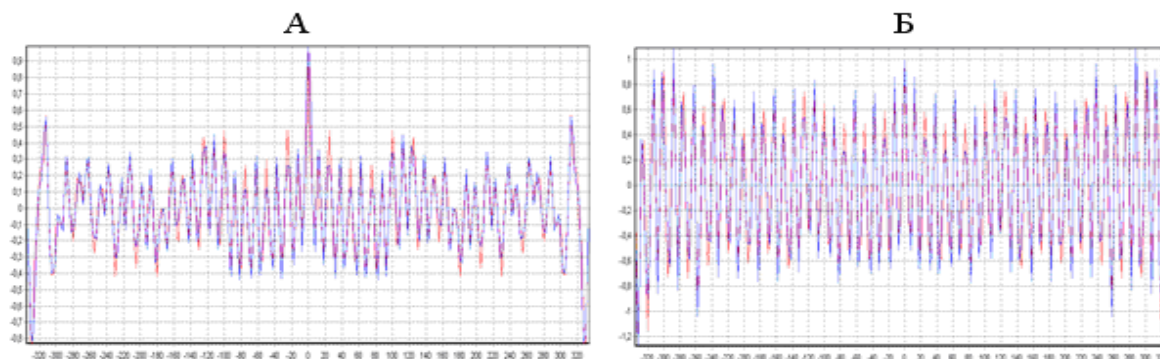


Рис. 12. АКФ по результатам испытания КС (вариант Д):  
А – 1-й пояс (температура T4-1); Б - 5-й пояс (температура T4-5); В - 6-й пояс (температура T4-6)

### Взаимный корреляционный анализ

На рис. 13 приведены графики коэффициентов корреляции для ВКФ малоэмиссионной КС.

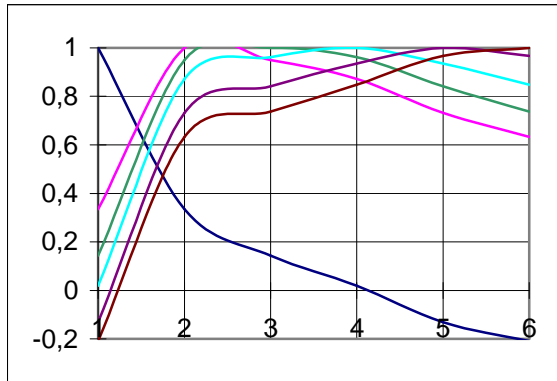


Рис. 13. Коэффициенты корреляции между поясами T4-1 - T4-j камеры сгорания (вариант Д)

Из рис. 13 видно, что уровень корреляции процессов между поясами высокий. Процессы взаимозависимы. Причём даже удалённые пояса (например, 2-й и 6-й) имеют коэффициент корреляции на уровне 0,7. Это свидетельствует о хорошем смещении и однородности потоков газа.

Однако 1-й пояс имеет очень низкую корреляцию с процессами со 2-го по 6-й пояс. Это свидетельствует о плохом сме-

щении потока в районе 1-го пояса с соседними потоками.

Но, в то же время, данный факт свидетельствует о благоприятных условиях для организации надёжного охлаждения стенок внутреннего кожуха как наиболее теплонапряжённого.

### Спектральный анализ

Проведём спектральный анализ массива показаний температур КС варианта Д на предмет выявления гармонической составляющей процесса, замеченной при анализе АКФ.

По сравнению с данными по КС варианта В амплитуда частот примерно такая же и составляет 20-40 °С. На графике несколько максимумов, соответствующих: низким частотам 2-4-7 Гц, а также частотам 28, 56 Гц. Низкие частоты говорят, например, об отличии в настройке горелок по расходам топлива и воздуха или об отличии местных условий в КС.

В результате на температурном поле появляются провалы и вершины.

Частоты 28 и 56 Гц - это проявления воздействия на температурное поле горелок (28) и отверстий подвода воздуха в жаровой трубе (56). Амплитуды этих частот небольшие.

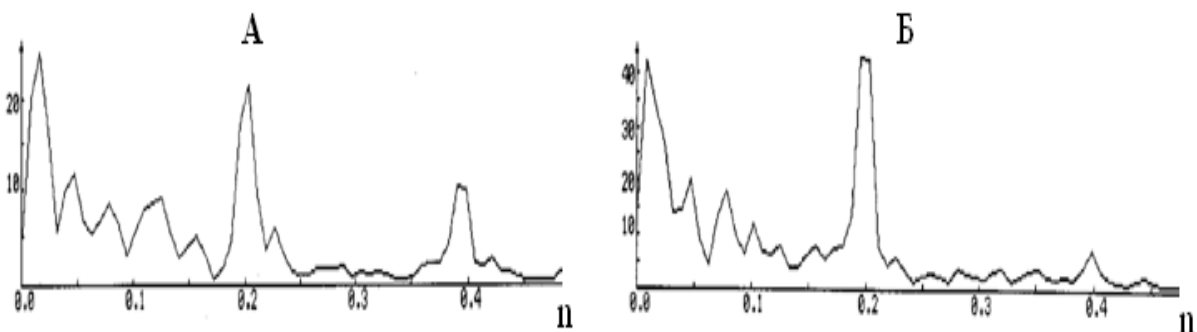


Рис. 14. Спектральный анализ по поясам КС (вариант Д):

А – спектр по 1-му поясу; Б – спектр по 6-му поясу

Таблица 4. Сводная таблица характеристик камер сгорания

КС	$\sigma$	ВКФ	СПМ
Г	Большой разброс значений (161-172 °С)	Коррелированы только ближние пояса. Коэффициенты корреляции по поясам б – j: 1) 0; 2) 0; 3) 0,2; 4) 0,6; 5) 0,8.	В спектре прослеживаются частоты, соответствующие числу головок, числу не горящих и плохо горящих головок. 1 Гц (110°С) и 11 Гц (170°С) Амплитуда частоты 11 Гц велика.
В	Небольшой разброс значений (42-63 °С)	Все пояса коррелированы. Коэффициенты корреляции по поясам б – j: 1) 0,4; 2) 0,5; 3) 0,65; 4) 0,83; 5) 0,95.	В спектре прослеживаются частоты, соответствующие: - числу горелок 1-го и 2-го контура: 28 Гц (10-12°С), 44 Гц (30-35°С); - числу холодных или горячих горелок. Амплитуды частот 28 и 44 Гц невелики.
Д	Небольшой разброс значений (28-57 °С)	Все пояса, кроме 1-го, хорошо коррелированы. Коэффициенты корреляции по поясам б – j: 1) 0; 2) 0,65; 3) 0,73; 4) 0,83; 5) 0,95.	В спектре прослеживаются частоты, соответствующие: - числу горелок 1-го и 2-го контура: 28 Гц (20°С), 56 Гц (40°С). Амплитуда частоты 28 Гц невелика.

### Выводы

Можно сделать следующие выводы:

1. Использование АКФ, ВКФ, СПМ для анализа результатов испытаний трёх вариантов КС (В, Г, Д), показало наличие связи между количеством горелок, головок и характеристиками температурного поля.

Проявляется и качество отстройки горелок (карбюраторов) КС.

2. ВКФ и коэффициенты корреляции отражают уровень коррелированности процессов в КС и характеризуют степень смещения потоков [4].

3. СПМ характеризует уровень качества настройки головок, карбюраторов и одновременно оценивает степень влияния конструкции на окружающую и радиальную неравномерность поля температур.

4. Расчёт АКФ, ВКФ, СПМ значительно расширяет возможности анализа экспериментальных испытаний нового варианта КС и оценки качества серийных изделий. Кроме того, появляется возможность формализовать оценки параметров КС и проводить количественные оценки вариантов конструкции и качества сборки.

5. Наилучшими характеристиками по  $\sigma$ , АКФ, ВКФ, спектру обладает вариант Д.

6. Дальнейшее повышение качества характеристик температурного поля по лучшему смещению потоков, уменьше-

нию разброса ( $\sigma$ ), отсутствию пиков на спектре частот видится в увеличении числа горелок и тщательной отстройке горелок (форсунок) по характеристикам.

### Библиографический список

1. Гриценко, Е. А. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст] / Е. А. Гриценко, В. П. Данильченко, С. В. Лукачев. – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 266 с.

2. Прохоров, С. А. Автоматизированная система аппроксимативного корреляционно-спектрального анализа в ортогональном базисе Бесселя [Текст] / С. А. Прохоров, Я. В. Газетова // Изв. высших учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. - 2010. - №2 (14). – С. 30-40.

3. Прикладной анализ случайных процессов [Текст] / под ред. С. А. Прохорова. – Самара: СНЦ РАН, 2007. - 582 с.

4. Прохоров, С. А. Перспективы применения программного комплекса аппроксимативного корреляционно-спектрального анализа для обработки результатов испытаний камер сгорания ГТД [Текст] / С. А. Прохоров, Я. В. Газетова // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010): избр. тр. Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодежи. – Самара: Изд-во ПГУ, 2010. – Т.1 - С. 38-42.

**APPROXIMATE CORRELATIVE-SPECTRAL ANALYSIS OF TEMPERATURE PATTERNS OF COMBUSTION CHAMBERS**

© 2012 S. A. Prokhorov<sup>1</sup>, S. A. Ilinsky<sup>2</sup>, T. G. Aleksandrova<sup>2</sup>, Ya. V. Solovyova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

<sup>2</sup> Open joint-stock company "Kuznetsov"

The paper presented the results of specifying diagnostic parameters of combustion chambers of gas turbine engines. The results were obtained with the help of an automated system of approximation correlative-spectral analysis in the Bessel orthogonal basis by producing models of correlative and spectral characteristics of the initial arrays of temperature values.

*Combustion chamber, spectrum, correlative function, approximation, coefficient of correlation.*

**Информация об авторах**

**Прохоров Сергей Антонович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и технологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sp@smr.ru](mailto:sp@smr.ru). Область научных интересов: автоматизированные системы для автоматизации научных исследований.

**Ильинский Станислав Алексеевич**, начальник отдела опытного конструкторского бюро, ОАО «Кузнецов». E-mail: [motor-s@bk.ru](mailto:motor-s@bk.ru). Область научных интересов: исследование динамических процессов в газотурбинном двигателе.

**Александрова Татьяна Геннадьевна**, ведущий инженер отдела опытного конструкторского бюро, ОАО «Кузнецов». E-mail: [motor-s@bk.ru](mailto:motor-s@bk.ru). Область научных интересов: исследование динамических процессов в газотурбинном двигателе.

**Соловьева Яна Владимировна**, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [yanka58@yandex.ru](mailto:yanka58@yandex.ru). Область научных интересов: методы и алгоритмы обработки случайных последовательностей.

**Prokhorov Sergey Antonovich**, Dr. Sci., professor, head of the department of information systems and technologies, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [sp@smr.ru](mailto:sp@smr.ru). Area of research: Computer aided systems for scientific research.

**Ilinsky Stanislav Alekseevich**, chief of department № 16, design bureau of the open joint-stock company "Kuznetsov". E-mail: [motor-s@bk.ru](mailto:motor-s@bk.ru). Area of research: research of dynamic processes in GTEs.

**Aleksandrova Tatyana Gennadevna**, leading engineer of department, design office of the open joint-stock company " Kuznetsov ". E-mail: [motor-s@bk.ru](mailto:motor-s@bk.ru). Area of research: research of dynamic processes in GTEs.

**Solovyova Yana Vladimirovna**, post-graduate student of the department of information systems and technologies, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [yanka58@yandex.ru](mailto:yanka58@yandex.ru). Area of research: methods and algorithms of processing of random sequences.

УДК 629.78:621.39

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И НАВЕДЕНИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

©2012 В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, С. Г. Сафронов

Самарский государственный технический университет

Рассматривается структура комбинированной корреляционно-экстремальной системы обработки и анализа визуальной информации, предназначенной для решения задач управления и наведения подвижных носителей средств дистанционного зондирования и обеспечивающей распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены в реальном масштабе времени. Описываются алгоритмы функционирования в режимах обнаружения заданных объектов, наведения целевой аппаратуры на опознанные объекты и стабилизации линии визирования целевой аппаратуры на опознанном объекте при движении носителя относительно наблюдаемой сцены. Рассмотрен способ повышения надёжности сопровождения при изменениях текущей информации, возникающих в процессе наведения. Приводятся результаты исследований эффективности распознавания бинарных корреляционных алгоритмов при воздействии таких помех как яркость, изменение контраста, смаза изображения для различных значений сигнала к шуму, а также результаты экспериментальных исследований макетного образца системы на специализированном стенде.

*Управление, навигация, наведение, изображение, корреляция, эталон, экстремум, координаты, дистанционное зондирование, моделирование, структура.*

Стремительное развитие информационных технологий позволило существенно расширить использование методов дистанционного зондирования на автономных мобильных носителях. Системы дистанционного зондирования, размещённые на борту космических аппаратов, позволяют проводить глобальный экологический и климатический мониторинг, исследования природных ресурсов, оценку последствий природных и техногенных катастроф и т.д. [1]. Аппаратура зондирования, установленная на низколетящих и подвижных наземных носителях, позволяет решать аналогичные задачи в региональных и локальных масштабах [2].

Основной целевой задачей средств дистанционного зондирования является получение высококачественной визуальной информации, обеспечивающей возможность надёжного распознавания объектов заданных классов, оценки текущей ситуации на наблюдаемой сцене и построение прогноза её развития.

Наличие на борту носителя аппаратуры наблюдения, а также систем, обес-

печивающих оптимальные условия получения видеоинформации, позволяет ввести в контур управления систему обработки и анализа изображения для получения дополнительной информации, необходимой для навигации и наведения носителя на район наблюдения [3,4]. Использование таких комбинированных систем позволяет реализовать программно-адаптивный принцип управления, т.е. замкнуть контур управления носителя на объект, обеспечивающий решение основной целевой задачи – район наблюдения, и тем самым парировать ошибки основного контура управления, так как результирующая ошибка наведения в этом случае определяется лишь погрешностями системы обработки изображений [5,6].

В работе рассматриваются принципы построения и структура оптико-электронной корреляционной системы, предназначенной для использования в контуре управления подвижных носителей средств дистанционного зондирования, обеспечивающей распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены в

реальном масштабе времени, определения их координат и наведения линии визирования аппаратуры наблюдения на опознанные объекты.

Принцип действия системы (рис.1) основан на корреляционном сравнении текущего информационного массива, считываемого с первичного преобразователя информации (ППИ) на базе приборов зарядовой связи (ПЗС) с эталонным информационным массивом (ЭИ), хранящимся в библиотеке эталонной информации (БЭИ).

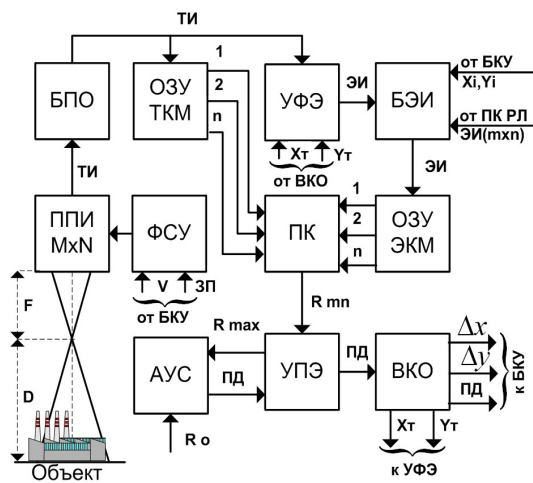


Рис.1. Структура комбинированной системы навигации и наведения

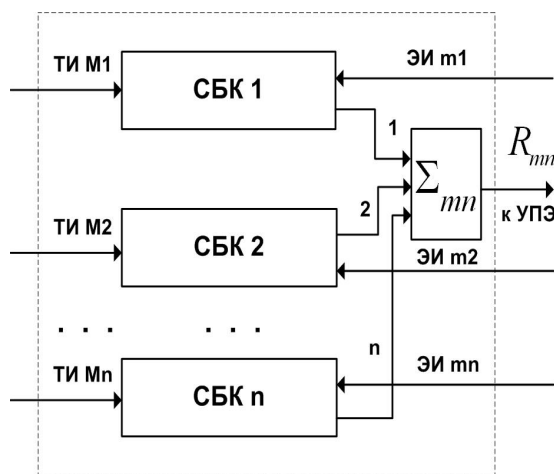


Рис. 2. Структура параллельного бинарного коррелятора

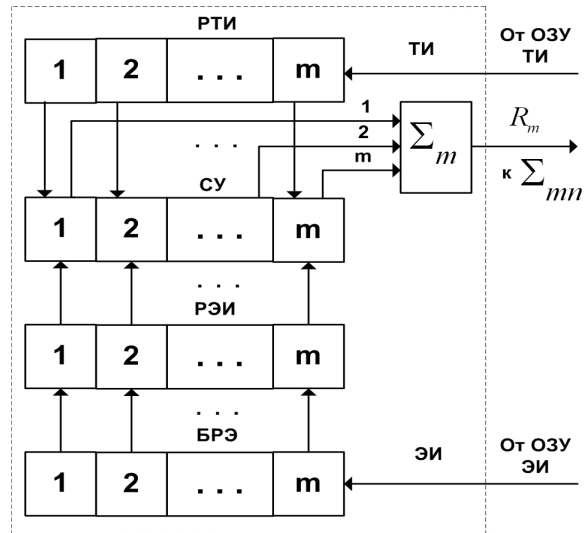


Рис. 3. Структура строчного бинарного коррелятора

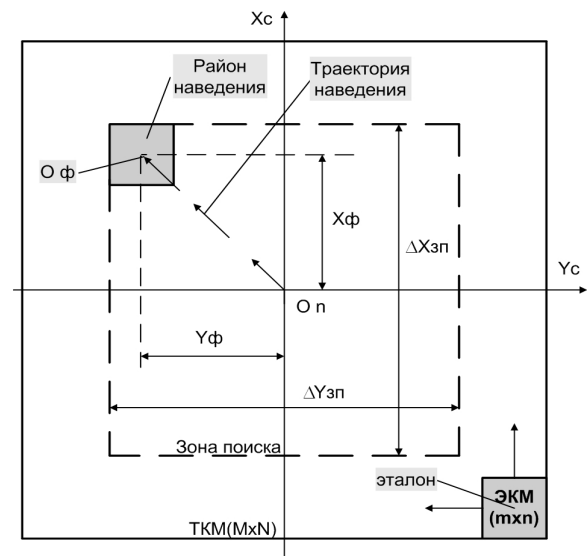


Рис. 4. Алгоритм совмещения ТКМ и ЭКМ и вычисления поправок наведения

Система может работать с сигналами, снимаемыми с ППИ, видимого, инфракрасного или сверхвысокого частотного диапазонов длин волн электромагнитных колебаний. В качестве источника текущей информации (ТИ) может служить основная функциональная аппаратура наблюдения, или собственный блок чувствительных элементов. Эталонная информация выбирается и записывается в БЭИ при планировании маршрута. В качестве эталонов используются цифровые (бинарные) изображения элементов района наблюдения и/или характерные фрагменты



(опорные ориентиры), расположенные вдоль трассы движения на промежуточных участках коррекции траектории носителя.

При изменении программы движения ЭИ может дополняться и изменяться по программно-командной радиолинии (ПКРЛ) из центра управления и планирования маршрута движения носителя. Система имеет три основных режима функционирования: обнаружения (РО), наведения (РН) и стабилизации (РС).

При подходе к району наблюдения или очередному участку коррекции система начинает работу в режиме обнаружения. При этом с бортового комплекса управления (БКУ) в БЭИ поступает команда на перезапись очередного цифрового бинарного изображения эталона в оперативное запоминающее устройство эталонной картой местности (ОЗУ ЭКМ) формата  $(m \times n)$  элементов разложения, одновременно с БКУ на формирователь сигналов управления ППИ (ФСУ) передается информация о расчётных значениях скорости движения изображения и программных значениях координат ориентира. По этим данным ФСУ рассчитывает время накопления заряда в ППИ, координаты и размер зоны поиска. Перечисленные параметры определяются исходя из следующих соображений.

Время накопления (экспонирования)  $t_q$  влияет на величину смаза изображения (фактически на разрешение) и значения соотношения сигнал/шум и зависит от параметров оптической системы, характеристик фотоприёмника, условий наблюдения и освещённости фокальной плоскости.

Для получения качественного видеосигнала время накопления заряда в ППИ должно соответствовать времени движения элемента изображения по фотовоспринимающей ячейке ПЗС:

$$t_q \approx \frac{\Delta n \cdot D}{V_o \cdot F}, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  - размер фотовоспринимающей ячейки;  $D$  - дальность до предметной

плоскости;  $V_o$  - скорость движения носителя;  $F$  - фокусное расстояние оптической системы.

Кроме условия (1) должно выполняться и условие

$$\Psi_p \geq k \frac{E}{E_n}, \quad (2)$$

где  $\Psi_p$  - отношение сигнал/шум на выходе ППИ;  $E$  - освещённость фокальной плоскости;  $E_n$  - пороговая освещённость, соответствующая  $\Psi = 1$ ;  $k$  - коэффициент, зависящий от требуемых значений вероятностей правильного обнаружения ложной тревоги.

Размер зоны поиска определяется исходя из максимально возможных ошибок предварительных целеуказаний БКУ по дальности и боку, погрешностей измерения положения связанной системы координат  $(XYZ)_c$  относительно базовых  $(XYZ)_o$  и др.

На основании рассчитанных данных ФСУ формирует соответствующие команды управления работой ППИ. Видеосигнал с ППИ подаётся в блок предварительной обработки (БПО), в котором осуществляется его фильтрация и бинарное кодирование. Бинарный сигнал записывается в ОЗУ текущей карты местности (ТКМ) ёмкостью  $(M \times n)$  бинарных отсчётов. ОЗУ ТКМ имеет  $n$  параллельных выходов, соединённых с  $n$  входами параллельного коррелятора (ПК) (рис.2). Параллельный бинарный коррелятор (ПК) выполнен на базе  $n$  сверхбольших интегральных схем строчного бинарного коррелятора (СБК), в котором осуществляется параллельное сравнение с  $m$  элементами строки эталонной информации в каждом такте поступления информации из ОЗУ ТИ (рис.3). На другие  $n$  входов ПК поступает информация с ОЗУ ЭКМ. В результате в ПК методом «скользящего окна» в каждом такте поступления информации с ППИ происходит параллельное сравнение текущего и эталонного массивов в окне

$(m \times n)$  при всех возможных положениях эталона в зоне поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$  (рис.4).

Параллельный коррелятор ПК рассчитывает значение критериальной функции меры сходства изображений по алгоритму

$$R(m, n) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(M, N) \oplus G(m-i, n-j), \quad (3)$$

где  $R(m, n)$  – функция меры сходства;  $G(m, n)$  – текущий информационный массив;  $(m \times n)$  – эталонные изображения;  $(m \times n)$  – формат эталонного изображения;  $M \times N$  – формат текущей карты местности.

Для сокращения времени обнаружения так называемые «пустые зоны» гасятся, т.е. считывание информации с ППИ происходит только в зоне поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$ . Коэффициент сокращения временных затрат  $d$ , равный

$$d = \frac{M \cdot N}{\Delta M \cdot \Delta N}, \quad (4)$$

может достигать значения  $d \geq 8 \dots 15$  в зависимости от возможных значений ошибок предварительных целеуказаний БКУ.

Значения отсчётов функции взаимной корреляции  $R_{mn}$  с ПК поступают в устройство поиска экстремума (УПЭ), в котором запоминаются значения глобального максимума  $R_{\max}$  и его положения  $(X_{\phi} Y_{\phi})$  относительно системы координат, связанной с линией визирования  $(XOY)_c$ .

Значение глобального максимума  $R_{\max}$  сравнивается в анализаторе условий сравнения (АУС) с порогом  $R_o$ , который рассчитывается, исходя из условия получения требуемых значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги. Если выполняется условие  $R_{\max} > R_o$ , анализатор АУС выдаёт команду в вычислитель координат ориентира (ВКО), в котором вычисляется разность между фактическим и программным положением ориентира:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_{\phi} - X_n, \\ \Delta Y &= Y_{\phi} - Y_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные результаты передаются в БКУ вместе с признаком достоверности результатов измерений (ПД). Отклонения  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  имеют две составляющие. Первая обусловлена ошибками навигационного прогноза по дальности и боку, вторая возникает из-за погрешности измерения углового положения носителя. При необходимости они могут быть разделены с использованием дополнительной информации со спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS или других средств носителя.

Признак ПД формируется на основании значений  $R_{\max}$  и сравнения полученных отклонений с максимально возможными ошибками предварительных целеуказаний основной системы управления и навигации.

В случае, если в режиме обнаружения использовался фрагмент района наблюдения, система переходит в режим наведения. При этом УФЭ перезаписывает эталонное изображение опознанного фрагмента (ориентира) с ТКМ в ОЗУ ЭКМ параллельного коррелятора.

В режиме наведения размеры зоны поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$  могут быть значительно сокращены, т.к. неопределённость в положении ориентира, обусловленная погрешностями основной системы, будет устранена. Размеры зоны поиска в этом случае определяются только динамикой наведения.

Кроме того, перезапись эталона с ТКМ позволяет существенно повысить надёжность сопровождения ориентира в процессе наведения, т.к. устраняются искажения, возникающие при подготовке эталона и текущих условий наблюдений.

После перезаписи эталона может быть изменён порог принятия решения  $R_o$  с целью оптимизации соотношения между вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

В режиме наведения РН система работает следующим образом.

После перезаписи эталона  $G(m, n)$  и коррекции размеров зоны поиска ( $\Delta M_k \times \Delta N_k$ ) производится повторное распознавание ориентира, определение его текущих координат и передача их значения в БКУ, по командам которого исполнительные органы системы управления носителя начинают разворачивать линию визирования в направлении опознанного фрагмента в соответствии с принятым законом наведения. Измерение координат ориентира осуществляется в каждом кадровом периоде. Положение стробов зоны поиска изменяется в соответствии с изменениями положения ориентира в системе координат, связанной с линией визирования аппаратуры наблюдения (рис.4). Дискретность измерений определяется динамическими возможностями системы управления.

Процесс наведения заканчивается при совмещении линии визирования с центром опознанного фрагмента района наблюдения.

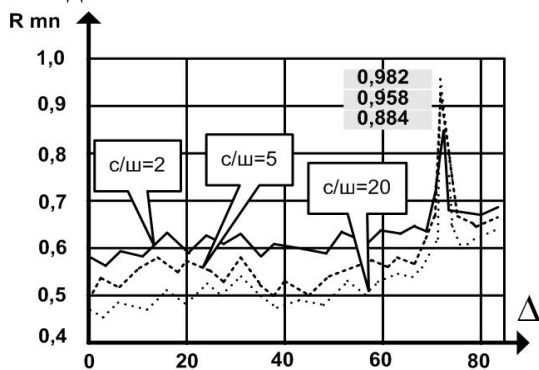


Рис. 5. Вид функции  $R_{mn}$  для эталона типа «Излучина реки» формата (32x32) элемента

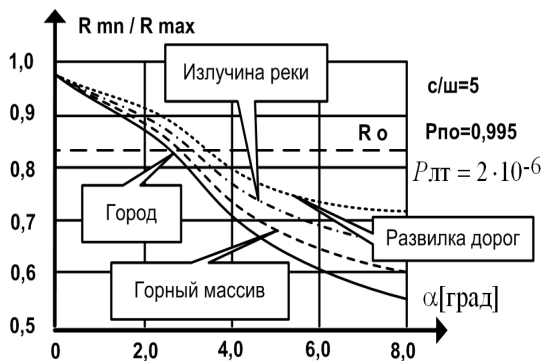


Рис. 6. Диаграмма функции  $R_{mn}$  в зависимости от изменений угла ориентации ТИ относительно ЭИ

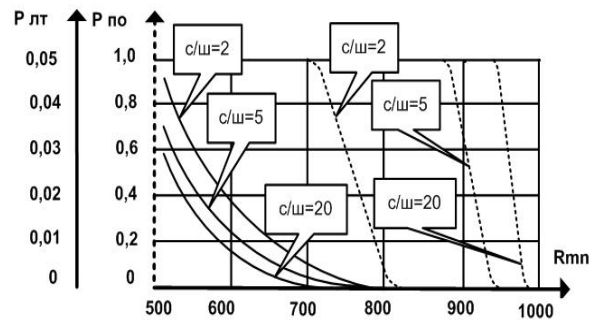


Рис. 7. Вероятность правильного обнаружения  $P_{по}$  и ложной тревоги  $P_{лт}$  для эталона типа «Излучина реки» формата (32x32)

Для предотвращения срыва сопровождения из-за изменений условий наблюдения ориентира предусмотрена динамическая перезапись эталона в процессе наведения. С этой целью в анализаторе АУС производится сравнение максимального значения функции меры сходства  $R_{max}(m, n)$ , полученного после перезаписи эталона, с её текущими значениями  $R_i(m, n)$ . Если в процессе наведения деградация текущих значений максимумов  $R_i(m, n)$  достигает некоторого порогового значения

$$\Delta_p = R_{max}(m, n) - R_i(m, n),$$

при котором возможен срыв сопровождения, АУС выдаёт команду в устройство УФЭ на перезапись эталона.

После совмещения линии визирования с центром ориентира система может переходить на работу в режиме стабилизации линии визирования при выполнении стереосъёмки и решении ряда других задач. В режиме стабилизации РС система обеспечивает измерение отклонений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  и парирование искажений ориентира при изменении положения носителя относительно наблюдаемой сцены по ал-

горитму, аналогичному режиму наведения РН. Время стабилизации наблюдаемой сцены определяется требуемыми размерами стереобазы.

Одной из проблем при создании корреляционно-экстремальных систем является обеспечение их надёжного функционирования при воздействии различного рода помех. Поэтому при проведении исследований по созданию системы обнаружения и наведения проводилось математическое моделирование методов обработки и анализа визуальной информации, а также экспериментальная отработка элементов системы с целью оценки влияния на её функционирование различных мешающих факторов. В частности, исследовалось влияние изменений освещённости, контрастности, смаза изображения, отношения сигнала к шуму на выходе фотоэлектрического преобразователя на эффективность алгоритмов распознавания [7].

Модель текущего искажённого изображения, снимаемого с матричного фотоэлектрического преобразователя, представлялась в виде

$$F(i, j) = \frac{a}{e+1} \times \left[ \sum_0^e F(i+e, j) \pm b \frac{1}{M \times N} \sum_1^M \sum_1^N F(i, j) \right] + H(i, j), \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $e$  - параметры яркостных, контрастных искажений и смаза изображения соответственно;  $H(i, j)$  - аддитивный случайный шум.

Дисперсия шумового поля  $H(i, j)$  определялась из выражения

$$d_{\text{ш}}^2 = \frac{d_c^2}{\psi}, \quad (7)$$

где  $\psi$  - заданное отношение сигнала к шуму;  $d_c^2$  - дисперсия сигнала изображения.

На рис.5 приведён вид критериальной функции меры сходства  $R_{mn}$  в районе зоны поиска по изображению типа «излучина реки» с разрешением  $r \approx 10$ м для

различных значений отношения сигнала к шуму, при размере эталона  $(32 \times 32)$  элемента разложения и бинарном кодировании маской  $(5 \times 5)$ .

Отработка оптико-электронной системы проводилась на специальной установке, обеспечивающей изменение ориентации, масштаба углов визирования и линейного перемещения наблюдаемой сцены. Имитация фоновой обстановки обеспечивалась аэрокосмическими снимками и объёмными моделями некоторых объектов. Экспериментальные исследования проводились с использованием макетного образца системы.

На рис. 6 приведены графики зависимости деградации функции  $R_{mn}$  от изменения углов ориентации ТКМ относительно ЭКМ для различных типов изображений с разрешением от  $r \approx 0,5$ м («Развилка дорог») до  $r \approx 25$ м («Горный массив») при отношении сигнала к шуму  $\psi = 5$  и формате эталонов  $(32 \times 32)$  элементов разложения. На рис.6 показан порог принятия решения  $R_o \approx 0,83$ , соответствующий вероятности правильного обнаружения  $P_{no} \approx 0,995$  и ложной тревоги  $P_{лт} \approx 2 \times 10^{-6}$ .

На рис. 7 приведены зависимости вероятностей правильного обнаружения  $P_{no}$  и ложной тревоги  $P_{лт}$  от значения порога принятия решений  $R_o$  для различных значений отношения сигнала к шуму для изображения типа «Излучина реки» при формате эталона  $(32 \times 32)$  элемента разложения и бинарном кодировании входного сигнала изображения маской  $(5 \times 5)$ .

Анализ результатов математического моделирования и экспериментальной отработки показывает, что рассмотренная оптико-электронная система обработки и анализа визуальной информации может быть использована в системах управления и навигации подвижных автономных аппаратов и обеспечивает решение следующих задач:

- распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены;
- определение взаимного положения аппарата и опознанного фрагмента;
- наведение аппаратуры наблюдения на опознанный фрагмент;
- стабилизацию линии визирования на опознанном фрагменте.

### Библиографический список

1. Гарбук, С. В. Космические системы дистанционного зондирования земли [Текст] / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон - М.: «АиБ», 1995. – 296 с.
2. Казанцев, В. М. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды [Текст] / В. М. Казанцев, В. М. Белов, В. Н. Орлов / Под. ред. В. Н. Рождествина - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
3. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения [Текст] / В. К. Баклицкий - Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
4. Белоглазов, И. Н. Основы навигации по геофизическим полям [Текст] / И. Н. Белоглазов, Г. И. Джинджава, Г. П. Чигин - М.: Наука, 1991 – 396 с.
5. Сбродов, В. В. Оптико-электронная система опознавания и наведения [Текст] / В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, А. Д. Абрамов // Труды юбилейной научно-технической конференции «Датчик-98» Т.2: Гурзуф: Госстандарт, 1998.
6. Красильщиков, М. Н. Управление и наведение беспилотных маневренных аппаратов на основе современных информационных технологий [Текст] / Под. ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Серебрякова - М.: Физматлит, 2005. - 280 с.
7. Сбродов, В. В. Исследование эффективности алгоритмов опознавания ориентиров в комбинированных системах управления подвижных объектов [Текст] / В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, В. Г. Давыдов // Вестник СамГТУ - Самара: серия «Технические науки». – 2002. - Вып.8.

## SOLVING TASKS OF CONTROL AND TARGETING FOR REMOTE SENSING DEVICES BY SYSTEMS OF PROCESSING AND ANALYSIS OF VISUAL INFORMATION

© 2012 V. V. Sbrodov, V. P. Sviridov, S. G. Safronov

Samara State Technical University

The article addresses the structure of combined correlation and extreme system for processing and analysis of visual information to assist control and targeting of moving carriers and remote sensing devices, and to ensure real-time recognition of certain fragments of the surveyed scene. The authors describe algorithms of functioning in the following modes: identification of given objects, direction of targeting systems onto the identified objects, stabilization of sightline of the identified object while the carrier keeps moving relative to the surveyed scene. The article also dwells on a method to improve the reliability of guidance in conditions of current information changing in the process of direction. The results of the research in the efficiency of recognition of binary correlation algorithms under such interference as brightness, changes of contrast, picture smearing for different signal-to-noise ratios are presented. The results of experimental tests of the system prototype on a specialized bench are also given.

*Control, navigation, direction, image, correlation, reference, extreme, coordinates, remote sensing, modeling, structure.*

### **Информация об авторах**

**Сбродов Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Свиридов Вячеслав Павлович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Сафронов Сергей Геннадьевич**, аспирант кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Sbrodov Vladimir Vassilievich**, candidate of technical sciences, associate professor, “Electronic systems and Information Security” department, Assoc. Prof., State educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.

**Sviridov Vyacheslav Pavlovich**, candidate of technical sciences, associate professor, “Electronic systems and Information Security” department, professor, state educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.

**Safronov Sergei Gennadievich**, “Electronic systems and Information Security” department, postgraduate student, state educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.

УДК 629.7.05

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА ОБОРУДОВАНИЯ

©2012 Н. В. Чекрыжев, А. Н. Коптев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассматриваются принципы качественного подхода к перспективному методу проактивного обслуживания сложных систем бортового оборудования авиационной техники.

*Безопасность полётов, управление рисками, развитие отказа, проактивное техническое обслуживание.*

За последние 30 лет главной задачей развития авиационно-транспортной системы является поиск новых подходов в решении проблемы повышения безопасности полётов воздушных судов (ВС).

Очевидно, что традиционная ретроактивная (Reactive) идеология профилактики авиационных событий, построенная на строгом соблюдении нормативных требований и внедрении профилактических рекомендаций, разработанных по результатам расследования происшедших событий, себя исчерпала [1].

Поэтому ИКАО разработала принципиально новую идеологию профилактики авиационных происшествий и инцидентов, названную «управление безопасностью полётов».

Новая идеология предотвращения авиационных происшествий (АП) и инцидентов предполагает создание в авиакомпании системы управления безопасностью полетов (СУБП), которая:

- выявляет фактические и потенциальные угрозы безопасности;
- гарантирует принятие корректирующих мер, необходимых для уменьшения факторов риска/опасности;
- обеспечивает непрерывный мониторинг и регулярную оценку достигнутого уровня безопасности полётов.

СУБП акцентирована не на ожидании негативного события, а на выявлении

опасных факторов в авиационной системе, которые ещё не проявились, но могут стать причиной инцидентов, аварий и катастроф. Такой подход в профилактике авиационных происшествий получил наименование «проактивный» (Proactive).

По сути, проактивное обслуживание предполагает тот же реагирующий подход, как и обслуживание по состоянию с контролем параметров (ТЭП), но в качестве диагностических признаков выбираются такие параметры системы, наблюдение которых позволяет контролировать глубинные причины деградации факторов стабильности системы (рис. 1).

Накопленный опыт расследования авиационных событий показал, что каждое из них было обусловлено воздействием нескольких причин, которые долгое время скрывались в виде недостатков (опасных факторов или факторов риска) компонентов авиационной системы.

Пять базовых структурных элементов концепции безопасности полётов лежат в основе модели Ризона (рис. 2).

Меры по обеспечению безопасности полётов должны быть направлены на контроль за организационными процессами, содержащими скрытые условия в виде недостатков в конструкции оборудования, упущения в подготовке персонала и т.п., а также для улучшения условий на рабочем месте.

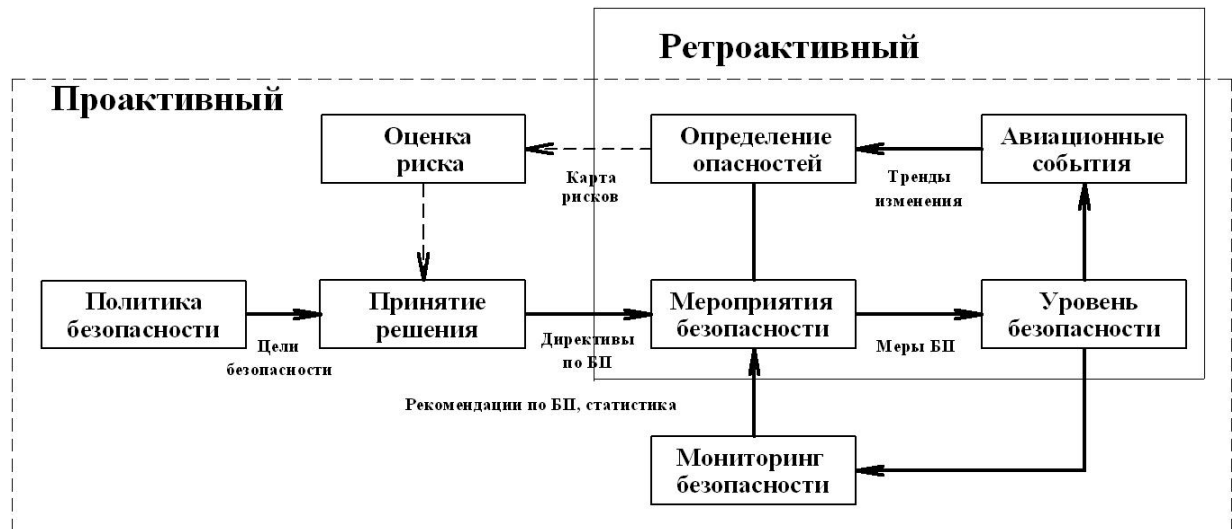


Рис. 1. Структура проактивного обслуживания

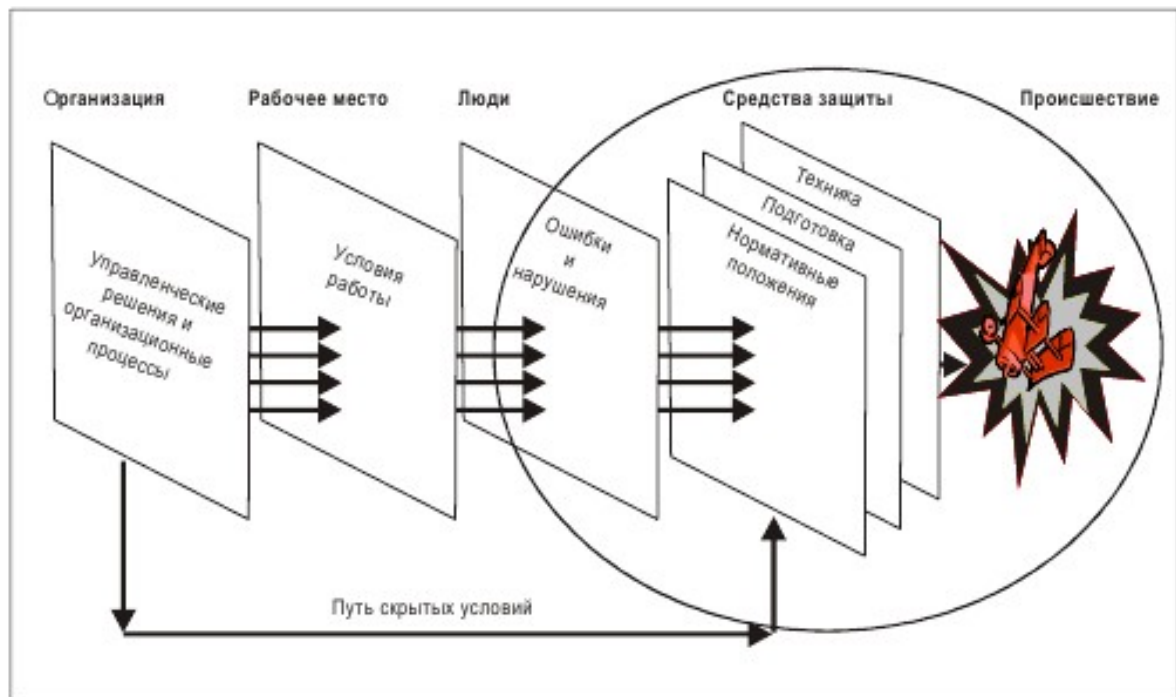


Рис. 2. Модель Ризона

Инструментом для анализа компонентов и особенностей эксплуатационных контекстов и их возможных взаимодействий с людьми является модель SHEL(L) (рис. 3), призванная дать общее представление о взаимосвязи индивидуумов с компонентами и особенностями рабочего места [2].

Рассмотренные выше стратегии и методы технического обслуживания авиационной техники направлены на устранение в основном очевидных неисправностей и отказов изделий функциональных систем (ФС) ВС.



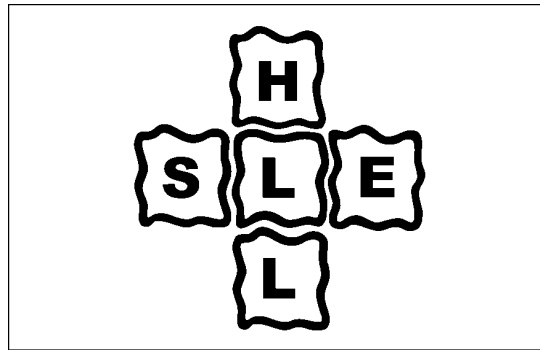


Рис. 3. Модель SHELL(L)

Накопленный опыт и практика расследования авиационных событий доказывают, что наличие любого скрытого недостатка в системе в виде опасного фактора или фактора риска может привести при определенных условиях к трансформации его в причину, которая и обуславливает последующее негативное событие.

Поэтому ИКАО предложила изменить содержание профилактических работ модели обеспечения безопасности полётов (ОБП) на проведение целенаправленной работы по выявлению и устранению

опасных факторов в каждом компоненте авиационной системы [1] модели управления безопасностью полетов (УБП) (рис. 4).

При внедрении управления БП (УБП) содержание профилактической работы определяется опасными факторами (ОФ) компонентов авиационной системы. Поэтому в соответствии с проактивным подходом в авиакомпаниях разрабатываются специальные методики, предназначенные для оценки степени риска прогнозируемых событий.

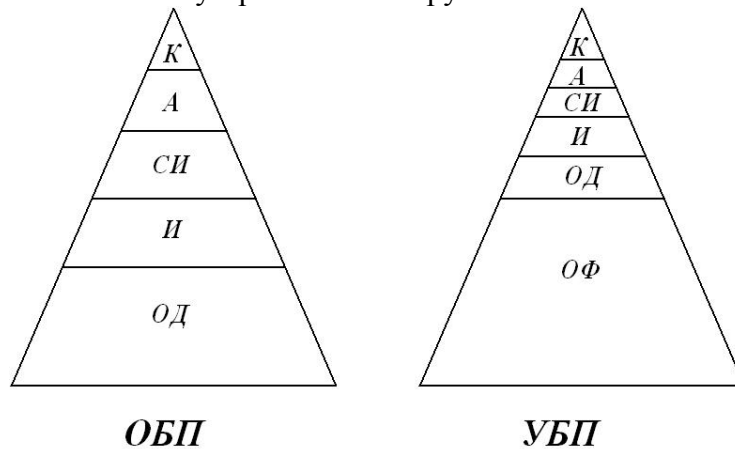


Рис. 4. Модели обеспечения (ОБП) и управления (УБП) безопасностью полетов: ОД – ошибочные действия, ОФ – опасные факторы, И – инциденты, СИ – серьезные инциденты, А – аварии, К – катастрофы

Практическая основа управления безопасностью – это управление рисками, методика которого изложена в «Программе управления рисками в отношении безопасности полётов». Переход от обеспечения (ОБП) к управлению безопасностью полётов (УБП) на практике означает проведение профилактических работ до развития авиационного события путём выявления и устранения источников

опасности (факторов риска) во всех компонентах авиационной системы.

В настоящее время расходы на техническое обслуживание составляют от 12 до 18% от прямых эксплуатационных расходов.

В соответствии с требованиями ИКАО на сегодняшний день одним из перспективных является метод упреждающего (проактивного) технического

обслуживания (Proactive Maintenance), основанный на использовании технологии прогнозирующего анализа (Predictive Analytics) компании Macsea.

Основанная на сборе и обработке информации технология позволяет прогнозировать дальнейшее развитие событий, реализована в пакете Macsea Dexter, который может осуществлять автоматический мониторинг и диагностику состояния любого оборудования. Система производит непрерывный анализ и обработку данных, оповещая оператора о появившихся или возможных проблемах, анализирует работу каждого компонента оборудования в реальном времени и прогнозирует его состояние и производительность в будущем [3].

По данным российской компании «Практическая Механика» при внедрении проактивного технического обслуживания время плановых остановов составляет не более 10% от общего времени работы оборудования, а среднее время между отказами по причине выхода из строя оборудования существенно увеличивается. По данным статистики прямые затраты на ТО при внеплановых ремонтах в 1,5 – 3 раза больше, чем при плановых, треть работ планово-предупредительных работ являются лишними, четверть запасных частей для ремонта лежит на складе без движения более двух лет.

Исследования компании Emerson Process Management показывают, что расходы на профилактическое обслуживание будут в 5 раз выше, а на обслуживание при необходимости - в 15 раз выше, чем в случае упреждающего подхода.

Основным направлением повышения эффективности работы авиакомпаний является увеличение налёта часов и снижение себестоимости единицы транспортной продукции.

Применение метода упреждающего обслуживания сокращает время вынужденных простоев ВС на техническом обслуживании (ТО), материальные и человеческие ресурсы, что повышает рентабельность авиакомпании.

Встроенные бортовые устройства регистрации информации самолётов последнего поколения позволяют получить дополнительные данные результатов диагностирования состояния и работы функциональных систем ВС вне аэропорта базирования, что повышает вероятность определения источника опасности (отказа) и уменьшает потребность в непосредственном осмотре оборудования.

В среднем незапланированное время простоя для типичного технологического процесса может стоить 1-3% дохода и 30-40% прибыли в год.

Мониторинг состояния ФС позволяет проводить ТО только тех изделий, которые этого требуют. Следовательно снижается общая трудоёмкость процедур технологического процесса, сокращаются расходы на материалы и объёмы запасного оборудования и сопутствующие затраты на его содержание, которые могут составлять 25% стоимости.

В процессе эксплуатации ВС его узлы и агрегаты подвергаются постоянному воздействию эксплуатационных факторов, влияющих на их техническое состояние, структурные параметры элементов изменяются, упорядоченность системы в целом и её функциональные качества ухудшаются, деградируют.

Работы теории старения машин Хрушова М. М., Зайцева А. К., Дьячкова А. К., Конвисарова Д. В. не дают полного анализа реального фактического состояния системы в целом, т.к. не учитывают случайного характера внешнего изменения условий работы отдельных её деталей и узлов (закономерностей ухудшения условий смазки во времени, нарушения регулировок в эксплуатации и т.д.) и не рассматривают работу изделий в комплексе.

Решение проблемы повышения надёжности ФС может быть получено только при комплексном подходе, предполагающем охват всех этапов эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла ВС.

Анализ надёжности функциональных систем ВС показывает, что большин-

ство эксплуатационных отказов носит постепенный характер, и связано это с нарастающим старением изделий системы [4].

Информацию о нарастающем старении систем можно получить из рассмотрения динамики некоторых определяющих параметров, как, например, количественная оценка механического износа элемента конструкции, расхода топлива, напряжения пружины, повышения вибрации вращающихся деталей; технологические и режимные параметры (температу-

ра, нагрузка, давление, влажность и др.); частицы износа в смазке и т.д.

Условия использования, приводящие к отклонению в параметрах источника отказа (условный отказ), вызывают разрушение материала объекта системы (начинающийся отказ), что является прямой причиной сбоев в работе (надвигающийся отказ), а это, в свою очередь, приводит к состоянию нарушения функционирования системы (крутому или катастрофическому отказу), как показано на рис. 5 [5].

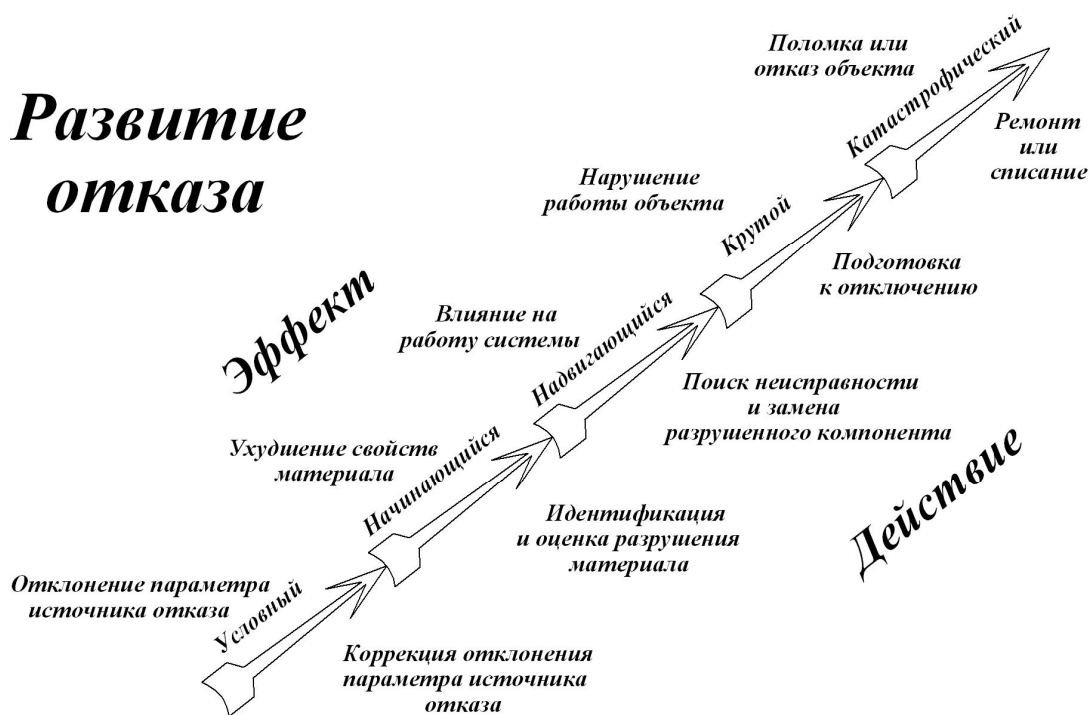


Рис. 5. Схема развития отказа

Идея проактивного технического обслуживания оборудования заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов.

Основой проактивного технического обслуживания являются:

- идентификация и устранение источников повторяющихся проблем, приводящих к сокращению межремонтного интервала объекта;

- устранение или значительное снижение факторов, отрицательно влияющих на межремонтный интервал или срок эксплуатации объекта;

- распознавание состояния объекта с целью проверки отсутствия признаков дефектов, уменьшающих межремонтный интервал;

- увеличение межремонтного интервала и срока эксплуатации объекта за счет проведения монтажных, наладочных и ремонтных работ в точном соответствии с техническими условиями и регламентом.

По сути, проактивное обслуживание предполагает тот же реагирующий подход, как и обслуживание по состоянию с контролем параметров, но в качестве диагностических признаков выбираются такие параметры системы, наблюдение которых даёт возможность контролировать глубинные причины деградации факторов стабильности системы. Мониторинг изменения свойств материала на ранних стадиях отклонения параметра источника отказа позволяет путём предупредительного обслуживания данного источника предот-

вратить дальнейшую деградацию системы в целом.

Характерные качественные особенности влияния различных подходов к техническому обслуживанию на процесс эксплуатации и межремонтные интервалы исследуемого объекта проиллюстрированы на рис. 6.

Кривая 1 (С<sub>0</sub>З) соответствует изменению состояния объекта эксплуатации при реактивном обслуживании (РО). Точка З соответствует поломке или отказу объекта или выработке ресурса, что предопределяет его замену или ремонт.

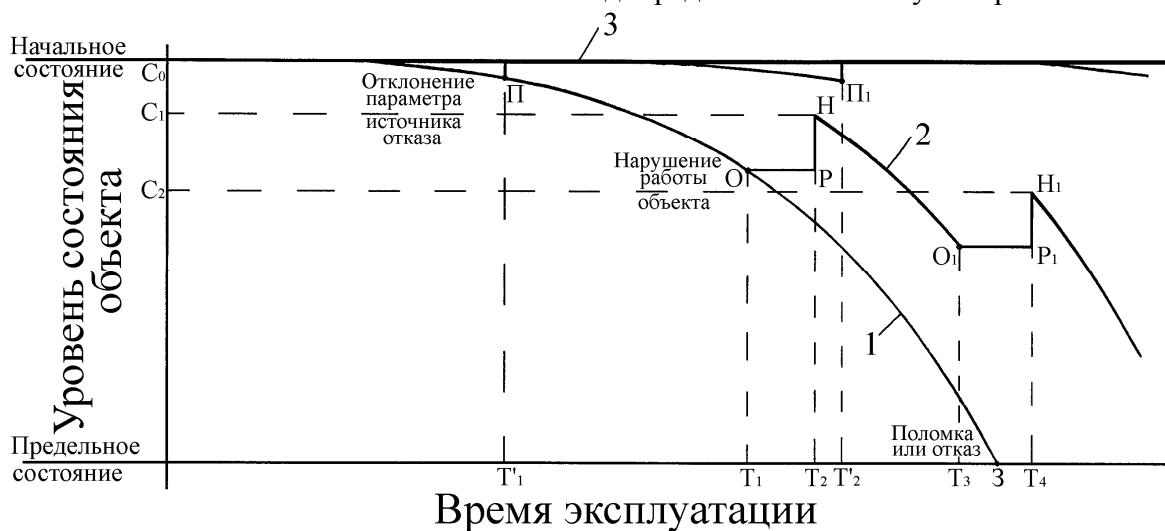


Рис. 6. Зависимость уровня технического состояния объекта от времени эксплуатации при различных видах обслуживания:

1 – реактивное обслуживание (РО), 2 – обслуживание по состоянию (ОС),  
3 – проактивное обслуживание (ПО)

График 2 характеризует эксплуатацию объекта при обслуживании по состоянию (ОС) и состоит из трёх участков. Кривая С<sub>0</sub>О соответствует изменению параметров объекта эксплуатации до достижения ими предельной величины в точке О. Горизонтальный участок ОР отражает время ремонта, а вертикальная линия РН – повышение уровня рабочего состояния объекта до величины С<sub>1</sub>. При этом время развития последующих отказов до ремонта в диапазоне от Т<sub>1</sub> до Т<sub>2</sub>, Т<sub>3</sub> и т.д. в среднем уменьшается, а начальный уровень состояния после проведения ремонта уже не достигает начального (С<sub>1</sub> < С<sub>0</sub>), так как отказы одних агрегатов системы оказы-

вают отрицательное влияние на работоспособность остальных.

График 3 характеризует эксплуатацию объекта при проактивном обслуживании (ПО). Как было отмечено выше, данный вид обслуживания является следующей ступенью развития метода ОС, поэтому общий вид зависимости 3 аналогичен графику 2. Точка П соответствует отклонению параметра источника отказа от нормы.

Горизонтальный участок отсутствует, т.к. корректировка состояния объекта до начального уровня С<sub>0</sub>, связанная с устранением глубинных причин отказов, как

правило, не требует временного выхода объекта из эксплуатации.

Данный рисунок наглядно отражает преимущества упреждающего подхода к ТО, основным из которых является отсутствие периодов вынужденного простоя объектов ТО, обусловленного ремонтом. Поэтому с некоторой долей идеализации для проактивного технического обслуживания характерен постоянный, не зависящий от времени эксплуатации уровень состояния  $S_0$  "вечного" агрегата, срок службы которого поддерживается путём систематического устранения источников дефектов, приводящих к преждевременному выходу его из строя.

По данным независимых опросов, средние показатели производственной экономии, достигнутые благодаря применению упреждающего подхода, составляют: рентабельность инвестиций – десятикратная, сокращение расходов на обслуживание – 25-30%, сокращение количества аварий – 70-75%, уменьшение времени простоя – 35-45%, увеличение производительности – 20-25%.

В связи с этим можно ожидать значительного эффекта от внедрения упреж-

дающего подхода к ТО функциональных систем ВС, в том числе и увеличения сроков их эксплуатации.

### Библиографический список

1. Doc. 9859 – AN/474. Руководство по управлению безопасностью полетов [Текст]. – ИКАО. - 2009.
2. Doc. 9859 – AN/460. Руководство по управлению безопасностью полетов [Текст]. – ИКАО. - 2006.
3. Хоске, М. Заботимся о «здоровье» оборудования [Текст] / М. Хоске // Control Engineering. - Россия. - Июль, 2006. - С.12-18.
4. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст] / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 208 с.
5. Fitch, E.C. Extending Component Service Life Through Proactive Maintenance / E.C. Fitch // An FES/BarDyne Technology Transfer Publication #2. Tribolics, Inc., 1998.

## PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF METHODS OF MAINTENANCE OF COMPLEX SYSTEMS OF AIRBORNE EQUIPMENT COMPLEX

© 2012 N. V. Chekrizhev, A. N. Koptev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper deals with the principles of a qualitative approach to a perspective method of proactive maintenance for complex systems of aircraft on-board equipment.

*Flight safety, management of risks, development of failure (refusal), proactive maintenance.*

### Информация об авторах

**Чекрыжев Николай Викторович**, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [samaranik@yandex.ru](mailto:samaranik@yandex.ru). Область научных интересов: контроль и испытания ЛА и их систем.

**Коптев Анатолий Никитович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [eat@ssau.ru](mailto:eat@ssau.ru). Область научных интересов: контроль и испытания ЛА и их систем.

**Nikolay Chekrizhev**, associate professor of the aircraft maintenance department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [samaranik@yandex.ru](mailto:samaranik@yandex.ru). Area of research: Control and testing of aircraft and their systems.

**Anatoliy Koptev**, doctor of technical sciences, professor, head of the aircraft maintenance department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [eat@ssau.ru](mailto:eat@ssau.ru). Area of research: Control and testing of aircraft and their systems.

УДК 621.914.6.001.57

## МОДЕЛЬ ОСНОВНОГО ЧЕРВЯКА ФРЕЗЫ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

© 2012 С. П. Андросов<sup>1</sup>, И. Г. Браилов<sup>2</sup>, Д. В. Визигин<sup>1</sup><sup>1</sup>Омский государственный технический университет<sup>2</sup>Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия

Определены уравнения винтовых поверхностей основного червяка фрезы для нарезания зубчатых колес, выраженные параметрическими векторными функциями. Разработана компьютерная программа для расчета и построения модели основного червяка фрезы.

*Червячная модульная фреза, основной червяк, векторная функция, моделирование.*

При проектировании и моделировании червячных модульных фрез одним из главных вопросов является определение профиля их зубьев [1]. Чтобы найти профиль зубьев фрезы и определить его характеристики, необходимо последовательно решить ряд задач: записать уравнение винтовой поверхности основного червяка; записать уравнения винтовой стружечной канавки и передней поверхности зубьев фрезы; выразить уравнение режущих кромок зубьев фрезы; образовать и записать уравнения боковых заточенных поверхностей зубьев фрезы; найти уравнения профиля в соответствующем сечении и определить его характеристики.

В данной статье рассматривается задача определения уравнений винтовых поверхностей основного червяка фрезы в матрично-векторной форме и разработки компьютерной модели основного червяка.

В настоящее время в производстве зубчатых колес наибольшее распространение получили червячные модульные фрезы, профилируемые и изготавливаемые на основе исходного архимедова червяка [1, 2]. Основной архимедов червяк представляет собой резьбовое изделие с трапециевидальным профилем резьбы в осевом сечении. Архимедова винтовая поверхность образуется при винтовом движении профиля. Сложное винтовое движение состоит из вращательного вокруг оси и

поступательного движения профиля вдоль этой же оси. Для определения профиля обкатных инструментов, как известно, применяются графические, графоаналитические и аналитические методы. Необходимая точность достигается только аналитическими методами [3]. В этой связи в работе рассматривается аналитическое описание профиля основного червяка фрезы векторными функциями.

Рассмотрим профиль зуба фрезы в осевом сечении (рис.1). Профиль имеет пять участков. Участки  $O_1A$  и  $O_5D$  являются образующими правой и левой боковых винтовых поверхностей червяка. Участок  $O_3C$  образует периферийную винтовую поверхность червяка, а участки  $AO_3$  и  $CO_5$  – поверхности закругления вершины зубьев. Следует отметить, что участки закругления ножки зуба при описании профиля не рассматриваются, так как они не принимают участия в процессе резания и формообразования зубьев нарезаемого колеса.

Угол профиля основного червяка определяется зависимостью

$$\operatorname{tg} \alpha_{x0} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\cos \gamma_{m0}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – угол профиля исходного контура;  $\gamma_{m0}$  – угол подъема винтовой линии на делительном цилиндре.

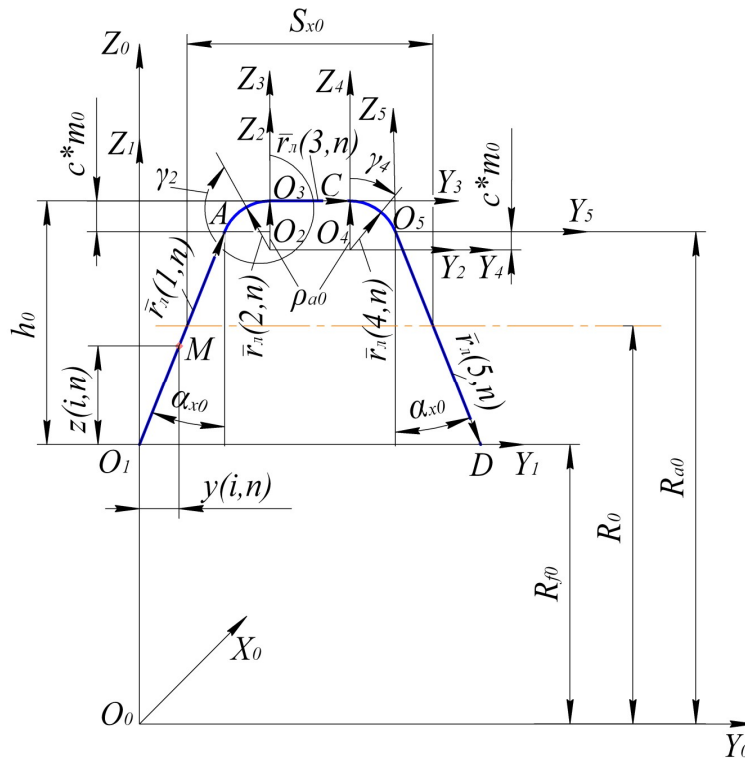


Рис. 1. Профиль основного червяка:

$r_{a0}$  – радиус закругления;  $\alpha_{x0}$  – угол профиля;  $h_0$  – высота профиля;  $S_{x0}$  – толщина профиля;  $m_0$  – модуль;  $c^*$  – коэффициент радиального зазора;  $R_{f0}$  – радиус внутреннего цилиндра;  $R_0$  – радиус делительного цилиндра;  $R_{a0}$  – радиус наружного цилиндра

Участки профиля в своих локальных системах координат  $Y_1O_1Z_1X_1$ ,  $Y_2O_2Z_2X_2$ ,  $Y_3O_3Z_3X_3$ ,  $Y_4O_4Z_4X_4$  и  $Y_5O_5Z_5X_5$  описываются векторами

$$\bar{r}_n(i,n) = \begin{bmatrix} 0 \\ y(i,n) \\ z(i,n) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер вектора,  $i = 1, \dots, 5$ ;  $n$  – количество точек на векторе,  $0 \leq n \leq p$ ,  $p$  – любое целое число.

Координаты точек на участках профиля, например точки  $M$  (рис. 1), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} y(i,n) &= l(i,n) \bar{e}_y(\bar{r}_n(i,n)); \\ z(i,n) &= l(i,n) \bar{e}_z(\bar{r}_n(i,n)), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\bar{e}_y(\bar{r}_n(i,n))$  и  $\bar{e}_z(\bar{r}_n(i,n))$  – орты векторов  $\bar{r}_n(i,n)$ ;  $l(i,n)$  – выбранное значение длины векторов  $\bar{r}_n(i,n)$ ,  $0 \leq l(i,n) \leq |\bar{r}_n(i,n)|$ .

Участки закругления профиля  $AO_3$  и  $CO_5$  описываются векторами:

$$\begin{aligned} \bar{r}_n(2,n) &= \begin{bmatrix} 0 \\ r_{a0} \sin g_2 \\ r_{a0} \cos g_2 \\ 1 \end{bmatrix}; \\ \bar{r}_n(4,n) &= \begin{bmatrix} 0 \\ r_{a0} \sin g_4 \\ r_{a0} \cos g_4 \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

где параметрические углы  $g_2$  и  $g_4$  имеют значения:  $270^\circ - \alpha_{x0} \leq g_2 \leq 360^\circ$ ;  $0^\circ \leq g_4 \leq 90^\circ - \alpha_{x0}$ .



Радиус закругления  $r_{a0}$  определяется по формуле [4]:

$$r_{a0} = \frac{c^* m_0}{1 - \sin a_{x0}}. \quad (5)$$

В глобальной системе координат  $Y_0O_0Z_0X_0$  векторы (2) запишутся:

$$\bar{r}_0(1,n) = [M_{10}] \bar{r}_x(1,n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{f0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 0 \\ y(1,n) \\ z(1,n) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y(1,n) \\ R_{f0} + z(1,n) \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{r}_0(2,n) = [M_{20}] \bar{r}_x(2,n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & B \\ 0 & 0 & 1 & R_{a0} - r_{a0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 0 \\ y(2,n) \\ z(2,n) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B + y(2,n) \\ R_{a0} - r_{a0} + z(2,n) \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $B = (h_0 - c^* m_0) \operatorname{tg} a_{x0} + r_{a0} \cos a_{x0}$ ;

$$\begin{aligned} \bar{r}_0(3,n) &= [M_{30}] \bar{r}_x(3,n) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & B \\ 0 & 0 & 1 & R_{a0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y(3,n) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ B + y(3,n) \\ R_{a0} \\ 1 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_0(4,n) &= [M_{40}] \bar{r}_x(4,n) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & B_1 \\ 0 & 0 & 1 & R_{a0} - \rho_{a0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y(4,n) \\ z(4,n) \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 + y(4,n) \\ R_{a0} - r_{a0} + z(4,n) \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где  $B_1 = S_{x0} + c^* m_0 \operatorname{tg} \alpha_{x0} - \rho_{a0} \cos \alpha_{x0}$ ;

$$\begin{aligned} \bar{r}_0(5,n) &= [M_{50}] \bar{r}_x(5,n) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_{x0} + c^* m_0 \operatorname{tg} \alpha_{x0} \\ 0 & 0 & 1 & R_{f0} + h_0 - c^* m_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \end{aligned}$$

$$\times \begin{bmatrix} 0 \\ y(5,n) \\ z(5,n) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ S_{x0} + c^* m_0 \operatorname{tg} \alpha_{x0} + y(5,n) \\ R_{f0} + h_0 - c^* m_0 + z(5,n) \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $[M_{i0}]$  – матрицы параллельных переносов локальных систем координат  $X_1O_1Y_1X_1$ ,  $X_2O_2Y_2X_2$ ,  $X_3O_3Y_3X_3$ ,  $X_4O_4Y_4X_4$  и  $X_5O_5Y_5X_5$ , соответственно.

Произвольная точка  $M$  архимедовой винтовой поверхности в системе координат фрезы  $X_0O_0Y_0Z_0$ , (рис. 2,а) описывается векторной функцией:

$$\bar{r}(i,n) = [M] \bar{r}_0(i,n), \quad (7)$$

где  $[M]$  – матрица преобразования поворотных движений против часовой стрелки вокруг оси  $O_0Y_0$  и поступательных движений вдоль этой оси:

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{\text{ч}} & 0 & -\sin \varphi_{\text{ч}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_{\text{ч}} \varphi_{\text{ч}} \\ \sin \varphi_{\text{ч}} & 0 & \cos \varphi_{\text{ч}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

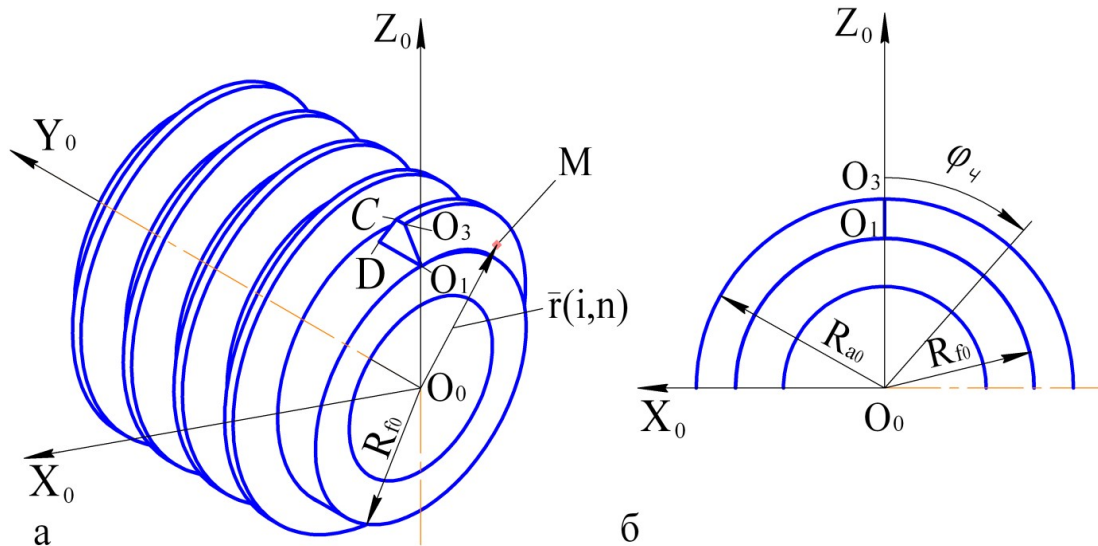


Рис. 2. Образование винтовой поверхности основного червяка

В формуле (8) угол  $j_\psi$  (рис. 2,б) является параметрическим углом поворота винтовой поверхности относительно начального положения. Выражение  $a_\psi j_\psi$  определяет проекцию вектора перемещения вдоль оси  $O_0Y_0$ . Величина  $a_\psi$  является винтовым параметром архимедова червяка. Значение винтового параметра  $a_\psi$  определяется выражением

$$a_\psi = \frac{P_{x0}}{2\pi}, \tag{10}$$

где  $P_{x0}$  – осевой шаг червяка.

По делительному цилиндру шаг  $P_{x0}$  вычисляется по формуле

$$P_{x0} = \frac{p m_0}{\cos g_{m0}}. \tag{11}$$

Максимальное значение угла  $\varphi_{\psi max}$  определяется зависимостью

$$\varphi_{\psi max} = \frac{L_p}{a_\psi}, \tag{12}$$

где  $L_p$  – длина рабочего участка фрезы.

После перемножения матрицы  $[M]$  и векторов  $\vec{r}_0(i, n)$  и преобразований получаем:

уравнение винтовой поверхности правой стороны витка червяка

$$\vec{r}(1, n) = \begin{bmatrix} -(R_{f0} + z(1, n)) \sin \varphi_\psi \\ y(1, n) + a_\psi \varphi_\psi \\ (R_{f0} + z(1, n)) \cos \varphi_\psi \end{bmatrix}; \tag{13}$$

уравнение винтовой поверхности правого участка закругления витка червяка

$$\vec{r}(2, n) = \begin{bmatrix} -(R_{a0} - r_{a0} + z(2, n)) \sin j_\psi \\ B + y(2, n) + a_\psi j_\psi \\ (R_{a0} - r_{a0} + z(2, n)) \cos j_\psi \end{bmatrix}; \tag{14}$$

уравнение винтовой периферийной стороны витка червяка

$$\vec{r}(3, n) = \begin{bmatrix} -R_{a0} \sin j_\psi \\ B + y(3, n) + a_\psi j_\psi \\ R_{a0} \cos j_\psi \end{bmatrix}; \tag{15}$$

уравнение винтовой поверхности левого участка закругления витка червяка

$$\bar{r}(4, n) = \begin{bmatrix} -(R_{a0} - r_{a0} + z(4, n)) \sin j_{\varphi} \\ B_1 + y(4, n) + a_{\varphi} j_{\varphi} \\ (R_{a0} - r_{a0} + z(4, n)) \cos j_{\varphi} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

уравнение винтовой поверхности левой стороны витка червяка

$$\bar{r}(5, n) = \begin{bmatrix} -(R_{f0} + h_0 - c^* m_0 + z(5, n)) \sin \varphi_{\varphi} \\ S_{x0} + c^* m_0 \operatorname{tg} \alpha_{x0} + y(5, n) + a_{\varphi} \varphi_{\varphi} \\ (R_{f0} + h_0 - c^* m_0 + z(5, n)) \cos \varphi_{\varphi} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

В общем виде векторная функция, описывающая винтовые поверхности основного червяка фрезы запишется:

$$\bar{r}(i, n) = \begin{bmatrix} -R(i, n) \sin \varphi_{\varphi} \\ Y(i, n) + a_{\varphi} \varphi_{\varphi} \\ R(i, n) \cos \varphi_{\varphi} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где  $R(i, n)$  – текущий радиус,  $R_{f0} \leq R(i, n) \leq R_{a0}$ ;  $Y(i, n)$  – текущая координата профиля по оси  $O_0Y_0$ ,  $0 \leq Y(i, n) \leq S_{x0} + h_0 \operatorname{tg} \alpha_{x0}$ .

На основании данной методики описания винтовых поверхностей основного червяка фрезы авторами разработана программа с использованием средств языка

*Achion script 3* для расчёта координат и визуализации поверхностей червяка. На рис. 3 приведена блок-схема расчёта и построения модели основного червяка фрезы. На рис. 4 показана компьютерная модель основного червяка фрезы.

Разработанная модель имеет существенные отличия от известных 3D моделей основного червяка фрезы [5], которые реализуются в графических редакторах с использованием инструментальных средств в виде чертежа и дальнейшим его перемещением и поворотом. Особенность предложенной модели заключается в том, что она является аналитической. В последующих этапах работы данная модель может использоваться при создании аналитической модели червячной модульной фрезы для определения уравнений режущих кромок и уравнений затылованных поверхностей её зубьев. Наряду с вычислением координат режущих кромок каждого из зубьев фрезы такая модель позволит определять характеристики профиля, например, вычислять касательные и нормали в любой точке кромки, необходимые при исследовании параметров процесса резания и формообразования при зубофрезеровании.

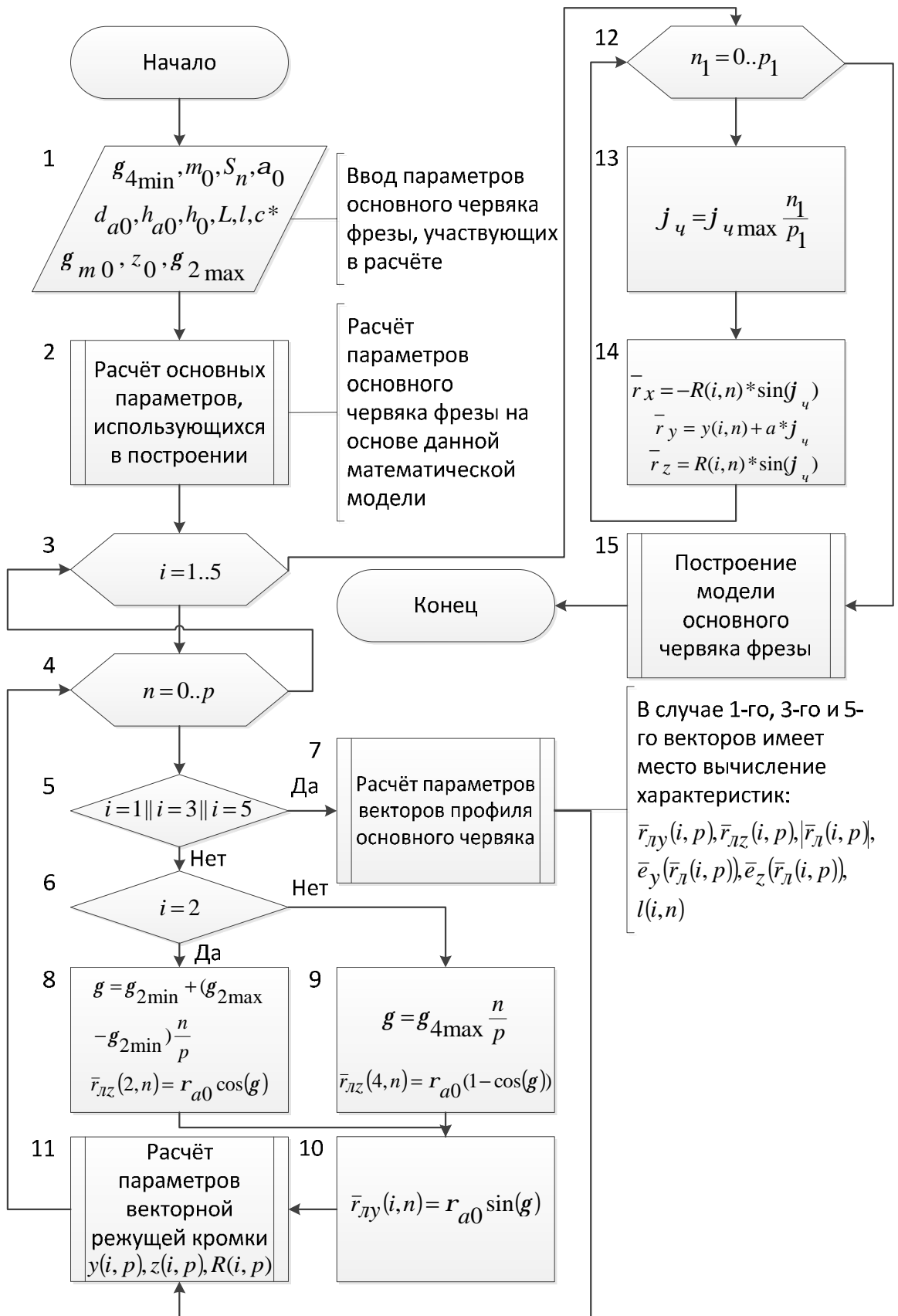


Рис. 3. Блок-схема алгоритма и построения модели основного червяка

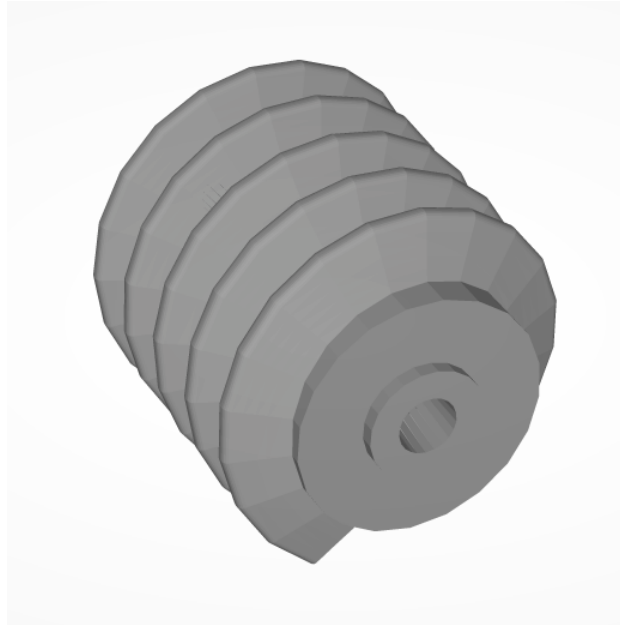


Рис. 4. Компьютерная модель основного червяка фрезы

#### Библиографический список

1. Иноземцев, Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов [Текст]: учеб. пособие / Г. Г. Иноземцев. – Машиностроение, 1984. – 272 с.
2. Фингер, М. Л. Цилиндрические колеса. Теория и практика изготовления [Текст] / М. Л. Фингер. – М.: Научная книга, 2005. – 368 с.
3. Режущий инструмент [Текст]: учеб. пособие / А. А. Рыжкин [и др.]. – Ростов н / Д: Феникс, 2009. – 405 с.
4. Полохин, О. В. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа [Текст]: справочник / О. В. Полохин, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов; под ред. Г. А. Харламова. – М.: Машиностроение, 2007. – 240 с.
5. Тахман, С. И. Создание 3D модели процесс зубофрезерования [Текст] / С. И. Тахман, Л. В. Рохин, О. А. Тюкалов // Вестн. Курганского гос. ун-та, 2010. - № 1. – С. 118-120.

#### MODEL OF THE MAIN WORM OF MILLING CUTTERS FOR GEAR CUTTING

© 2012 S. P. Androsov<sup>1</sup>, I. G. Brailov<sup>2</sup>, D. V. Vizigin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University

<sup>2</sup>Siberian State Automobile-Road Academy

The equations of helical surfaces of the main worm of milling cutters designed for gear cutting are defined. They are expressed with parameter vector functions. A computer program is developed for the calculation and construction of the model of the milling cutter main worm.

*Module hob, main gear, vector function, modelling.*

### Информация об авторах

**Андросов Сергей Павлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Омский государственный технический университет. E-mail: [asp57@list.ru](mailto:asp57@list.ru). Область научных интересов: моделирование формообразования операций механообработки, в том числе при зубофрезеровании.

**Браилов Иван Григорьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. Область научных интересов: моделирование формообразования операций механообработки, в том числе при зубофрезеровании.

**Визигин Денис Валерьевич**, студент факультета информационных технологий и компьютерных систем, Омский государственный технический университет. E-mail: [denis.vizigin@yandex.ru](mailto:denis.vizigin@yandex.ru). Область научных интересов: моделирование формообразования операций механообработки, в том числе при зубофрезеровании.

**Androsov Sergey Pavlovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of strength of materials, Omsk State Technical University. E-mail: [asp57@list.ru](mailto:asp57@list.ru). Area of research: simulation of forming operations of machine work including gear milling.

**Brailov Ivan Grigoryevich**, doctor of technical sciences, professor of the department of applied mechanics, Siberian State Automobile-Road Academy. Area of research: simulation of forming operations of machine work including gear milling.

**Vizigin Denis Valeryevich**, student of the faculty of information technologies and computer systems, Omsk State Technical University. E-mail: [denis.vizigin@yandex.ru](mailto:denis.vizigin@yandex.ru). Area of research: simulation of forming operations of machine work including gear milling.

УДК 621.431.75+620.22:629.7

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЕРИОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2012 И. Х. Бадамшин

Уфимский государственный авиационный технический университет

Показана возможность теоретической оценки зависимости периода кристаллической решётки монокристаллов от температуры. Выведена формула этой зависимости. Получена удовлетворительная сходимость с результатами экспериментов. На основе полученной формулы определяются коэффициент теплового расширения и модуль упругости компонентов эвтектического композита.

*Эвтектический композит, монокристалл, период кристаллической решётки, коэффициент теплового расширения, модуль упругости.*

### Введение

Перспективными материалами для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД являются эвтектические композиты [1], в состав которых входят нитевидные монокристаллы и дисперсно-упрочнённая монокристаллическая матрица.

Помимо обычных факторов, определяющих свойства композиций, таких как природа и соотношение компонентов, распределение их и др., термическое расширение композиционного материала в значительной степени определяется наличием в нём остаточных напряжений. В композиционном материале возникают напряжения, обусловленные различием коэффициентов теплового расширения компонентов. При некоторой температуре эти напряжения достигают предела текучести матрицы [2].

Для оценки коэффициента теплового расширения композита  $a_{км}$  в целом необходимо знать его составляющие: вдоль ( $a_1$ ) и поперёк ( $a_2$ ) волокон в зависимости от коэффициентов теплового расширения  $a_v$  волокон и  $a_m$  матрицы. Для изотропных волокон и матрицы такие соотношения приведены в работах [3, 4]. Для монокристаллов анизотропия коэффициента  $\alpha$  может достигать 300 % и более [5].

Задача определения коэффициентов  $a_v$ ,  $a_m$  для монокристаллов решается,

например, с учётом межатомного взаимодействия в кристаллической решётке. Так, коэффициент теплового расширения связан с температурой плавления и может характеризовать силу межатомной связи [5]. Максимальная сила межатомной связи приходится на металлы с максимальными температурами плавления и минимальными значениями коэффициента термического расширения. Соответственно эти металлы имеют и минимальные межатомные расстояния.

Для металлов с кубической решёткой коэффициент  $\alpha$  без учёта анизотропии связан с температурой плавления соотношением:  $aT_{пл} \cong 0,02$ . Кроме того, для веществ с металлическим характером связи имеется эмпирическое соотношение:  $\alpha = 7,24 \cdot 10^{-2} / T_{пл}^{1,19}$  [5]. Однако эти соотношения не позволяют устанавливать зависимость коэффициента теплового расширения от эксплуатационной температуры.

Расчёт коэффициента  $\alpha$  с учётом ангармонической составляющей колебаний атомов проводится по формуле [6]:

$$a = \frac{1}{x_0} \frac{d\langle x \rangle}{dT} = \frac{3kg}{4b^2x_0}, \quad (1)$$

где  $g$  и  $b$  - функции потенциала  $U$ ;  $x$  - расстояние между зарядами;  $x_0$  - расстояние между зарядами в равновесном состоя-

нии;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура. Здесь предполагается знание потенциала кристаллической решётки  $U$ , для определения которого нет методики аналитического расчёта.

Для оценки коэффициента теплового расширения по формуле Гилмана [5] необходимо знать силу межатомного сцепления  $\sigma_c$ :

$$\sigma_c = 3k/(8\alpha V), \quad (2)$$

где  $V$  – средний атомный объём.

Поэтому актуальной является задача разработки аналитической методики расчёта коэффициента теплового расширения применительно к монокристаллам материалов лопаток газовых турбин.

### Модель и сравнение с экспериментом

Армирующей фазой в эвтектических композитах является нитевидный монокристалл. В нём рассматривается элементарная атомная ячейка. Кристаллическая решётка находится в равновесном состоянии (силы притяжения уравновешены силами отталкивания). Потенциальная энергия взаимодействия зарядов  $U_0$  – величина постоянная, т. е. решается статическая задача.

Расчёт изменения периода кристаллической решётки вследствие повышения температуры основан на учёте изменения энергии связи двух разноимённых зарядов в атомной ячейке кристаллической решётки, т.е. между узлом решётки и электронным облаком в межузловом пространстве.

Энергия электростатической связи двух разноимённых зарядов атома в кристаллической решётке в соответствии с законом Кулона

$$U_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \frac{1}{2} a_0}, \quad (3)$$

где  $e$  – элементарный заряд, равный заряду электрона;  $p = 3,14$ ;  $a_0$  – период кристаллической решётки;  $e_0$  – электрическая постоянная;  $a_0/2$  – расстояние между разно-

имёнными зарядами (узлом кристаллической решётки и электронным облаком).

Тепловая энергия атома при нагреве ячейки монокристалла на величину  $\Delta T$  определяется как

$$U_T = c_v^1 \Delta T, \quad (4)$$

где  $c_v^1$  – теплоёмкость атома при постоянном объёме. В соответствии с законом Дюлонга и Пти

$$c_v^1 = c_v/N_A = 3k = 4.1421 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}, \quad (5)$$

где  $N_A$  – число Авогадро.

Энергия связи двух разноимённых зарядов атома в ячейке кристаллической решётки вследствие нагрева уменьшается на величину

$$\Delta U = U_0 - U_T. \quad (6)$$

Изменение среднего расстояния  $Dx$  между зарядами вследствие нагрева кристаллической решётки

$$\Delta x = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \frac{1}{2} \Delta U}. \quad (7)$$

Изменение периода кристаллической решётки вследствие нагрева

$$Da_0 = Dx - a_0/2.$$

После преобразований зависимость изменения периода кристаллической решётки от температуры примет следующий вид [7]:

$$\Delta a_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{e^2}{\frac{e^2}{a_0} - c_v^1 \Delta T 2pe_0} - a_0 \right). \quad (8)$$

Вследствие периодичности и симметрии бездефектного монокристалла свойства элементарной атомной ячейки передаются кристаллической решётке. Поэтому для атомной ячейки и кристаллической решётки в целом коэффициент теплового расширения определяется как



$$\alpha = \Delta a_0 / (a_0 \Delta T). \quad (9)$$

Необходимо отметить, что изменение периода кристаллической решётки от температуры зависит от силы химической связи.

Расчёт силы химической связи взаимодействия двух атомов выполняется на основе вихревой модели атома. Последовательность расчёта (на примере молекулы водорода) следующая.

Для упрощения расчёта вихревая модель атома (рис.1, а) заменяется механической моделью с сосредоточенными массами протона и электрона (рис.1, б).

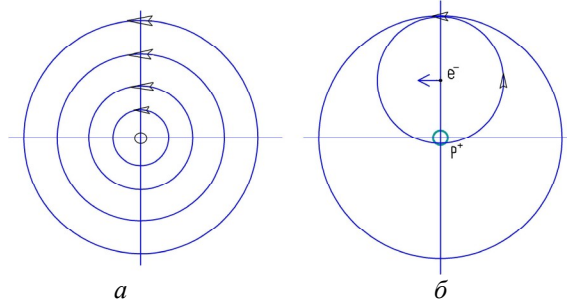


Рис. 1. Модель атома:

а - вихревая; б - со сосредоточенными массами

Из уравнения сохранения энергии, связывающего кинетическую энергию и потенциал ионизации атома водорода  $U = 21,7071 \cdot 10^{-19}$  Дж:

$$m_e V_S^2 / 2 = U, \quad (10)$$

определяется средняя суммарная скорость движения электрона по орбите в атоме водорода  $V_S$ , которая, в свою очередь, является среднеарифметической орбитальной  $V_o$  и вращательной  $V_e$  скоростей электрона.

Радиус электрона  $r_e$  принимается в соответствии с вихревой моделью атома (рис. 1, а, б), т.е.  $r_e = 0,5 r_H$ .

Центростремительное ускорение электрона в атоме водорода определяется по формуле

$$a = \frac{V_\Sigma^2}{2(2r_e)}. \quad (11)$$

Центростремительная сила в одном из взаимодействующих атомов водорода

определяется как  $F_1 = m_d a$ , где  $m_d$ , кг – доля взаимодействующей массы атома, показанная на рис.2 в виде заштрихованной области.

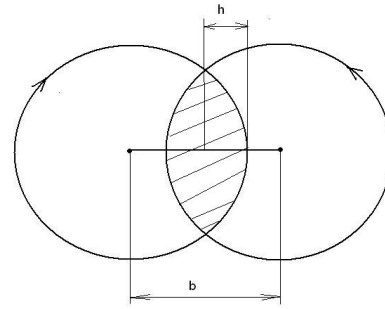


Рис. 2. Схема связи двух атомов

Поскольку плотность принимается постоянной, то доля взаимодействующей массы пропорциональна доле взаимодействующих объёмов. Объём шарового сегмента (заштрихованная область для одного атома) определяется по известным соотношениям из элементарной математики. Причём,  $h = r_H - b/2 = 0,136 - 0,074/2 = 0,099$  нм (рис. 2).

Тогда  $F_1 = m_d \cdot a = 4,8 \cdot 10^{-9}$  Н.

Справочное значение энергии химической связи молекулы водорода  $E_H$  составляет  $436 \cdot 10^3$  Дж/моль. Тогда энергия связи одного атома водорода определяется через число Авогадро  $N_A$

$$E^1 = E_H / 2N_A = 362,12 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}, \quad (12)$$

а сила химической связи как  $F_2 = E^1/h = 3,65 \cdot 10^{-9}$  Н. То есть результаты расчёта силы химической связи по вихревой модели атома  $F_1$  имеют расхождение в 31% с силой  $F_2$ , полученной по справочному значению энергии химической связи, что подтверждает адекватность вихревой модели атома.

Таким образом, результаты расчёта  $a_0$  в зависимости от температуры, приведённые в табл. 1 для некоторых металлов, удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными (рис.3) работы [5].

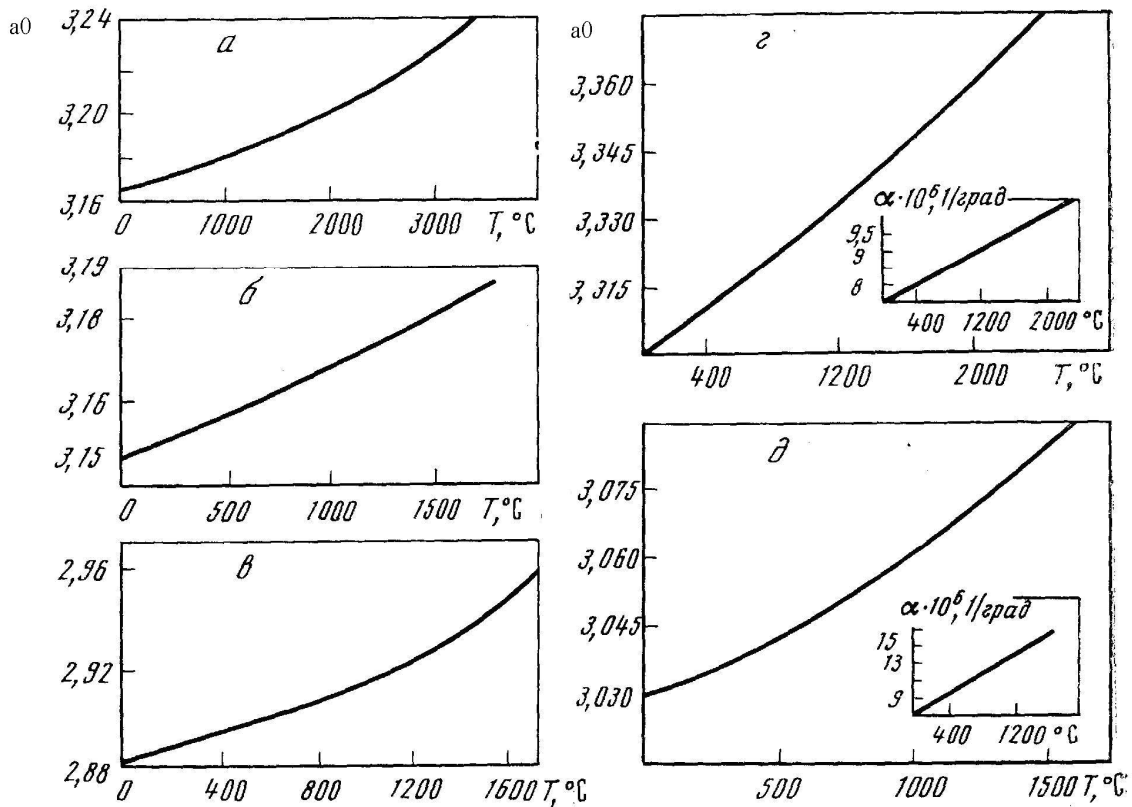


Рис. 3. Экспериментальная зависимость периодов кристаллической решётки от температуры  
 а – W; б – Mo; в – Cr; г – Nb; д – V [5]

Таблица 1. Результаты расчёта периода кристаллической решётки

T, °C	Период кристаллической решётки, $a_0 \cdot 10^{10}$ м														
	W			Mo			Cr			Nb			V		
	Рас- чёт	Экспе- ри- мент	Рас- хож- де- ние, %	Рас- чёт	Эк- пе- ри- мент	Расхо- жде- ние, %	Рас- чёт	Эк- пе- ри- мент	Рас- хож- де- ние, %	Рас- чёт	Эк- пе- ри- мент	Рас- хож- де- ние, %	Рас- чёт	Эк- пе- ри- мент	Рас- хож- де- ние, %
20	3,165	3,165	0	3,147	3,147	0	2,884	2,884	0	3,3002	3,300	0,00	3,0271	3,0271	0
100	3,170	3,166	0,12	3,147	3,149	0,06	2,888	2,885	0,10	3,305	3,303	0,06	3,031	3,032	0,03
200	3,174	3,167	0,22	3,151	3,151	0,15	2,892	2,887	0,17	3,310	3,305	0,15	3,035	3,034	0,03
300	3,179	3,17	0,28	3,156	3,153	0,22	2,895	2,891	0,13	3,315	3,307	0,24	3,040	3,036	0,03
400	3,183	3,171	0,37	3,160	3,155	0,31	2,899	2,894	0,17	3,320	3,310	0,30	3,044	3,039	0,13
500	3,188	3,172	0,50	3,165	3,157	0,41	2,903	2,897	0,20	3,325	3,313	0,36	3,048	3,042	0,16
600	3,193	3,174	0,59	3,170	3,160	0,44	2,907	2,900	0,24	3,330	3,315	0,45	3,052	3,045	0,19
700	3,197	3,175	0,69	3,174	3,162	0,53	2,911	2,904	0,24	3,335	3,318	0,51	3,056	3,048	0,22
800	3,202	3,177	0,78	3,179	3,165	0,56	2,915	2,907	0,27	3,340	3,321	0,57	3,061	3,053	0,26
900	3,207	3,178	0,91	3,183	3,167	0,66	2,918	2,910	0,27	3,345	3,324	0,63	3,065	3,057	0,26
1000	3,211	3,180	0,97	3,188	3,169	0,75	2,922	2,915	0,27	3,351	3,327	0,72	3,069	3,060	0,26
1100	3,216	3,181	1,10	3,193	3,171	0,81	2,926	2,920	0,27	3,356	3,330	0,78	3,074	3,065	0,29
1200	3,221	3,183	1,19	3,197	3,174	0,88	2,930	2,922	0,27	3,361	3,333	0,84	3,078	3,070	0,29
1300	3,226	3,185	1,28	3,202	3,176	0,97	2,934	2,927	0,23	3,366	3,336	0,89	3,083	3,075	0,26
1400	3,231	3,188	1,34	3,207	3,178	1,06	2,938	2,934	0,13	3,372	3,340	0,95	3,087	3,079	0,26
1500	3,236	3,190	1,44	3,212	3,182	1,09	2,942	2,940	0,07	3,377	3,343	1,01	3,091	3,084	0,25
1600		3,192			3,185			2,948			3,347				

Эти результаты могут быть получены для других элементов и их соединений. Они в дальнейшем используются для определения:

- коэффициента теплового расширения [7];
- модуля упругости [8];
- предела упругости [9]

и других характеристик компонентов эвтектических композитов.

В частности, в работе [8] приведены результаты расчёта модуля упругости углеродной нанотрубки (УНТ) и никеля.

### Выводы

1. Полученная формула позволяет определять теоретическую зависимость периода кристаллической решётки от температуры и значительно сокращать объём дорогостоящих экспериментов.

2. Результаты расчёта коэффициента теплового расширения армирующей фазы и матрицы эвтектического композита являются исходными данными, в частности, для оценки термических напряжений в материале лопатки турбины.

3. Разработанная методика позволяет использовать её для конструирования новых материалов для лопаток газовых турбин.

### Библиографический список

1. Светлов, И. Л. Высокотемпературные Nb-Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам [Текст] / И. Л. Светлов // Двигатель. – 2010. – №5. – С.36 – 37.

2. Портной, К. И. Структура и свойства композиционных материалов [Текст] / К. И. Портной, С. Е. Салибеков, И. Л.

Светлов, В. М. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.

3. Молодцов, Г. А. Применение современных композиционных материалов в самолётостроении. Учебное пособие [Текст] / Г. А. Молодцов. – М.: МАИ, 1984. – 52 с.

4. Васильев, В. В. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов. Учебное пособие [Текст] / В. В. Васильев, А. А. Добряков, А. А. Дудченко, Г. А. Молодцов, Ю. С. Цархов. – М.: МАИ, 1985. – 218 с.

5. Савицкий, Е. М. Монокристаллы тугоплавких и редких металлов и сплавов [Текст] / Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов. – М.: Наука, 1972. – 257 с.

6. Павлов, П. В. Физика твёрдого тела: Учеб.–3-е изд., стер [Текст] / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – М.: Высш. шк., 2000. – 494 с.

7. Бадамшин, И. Х. Расчёт упругих и теплофизических характеристик металлов и их тугоплавких соединений для оценки остаточных термических напряжений в эвтектических композитах и теплозащитных покрытиях [Текст] / И. Х. Бадамшин // Тяжёлое машиностроение. – 2007. – № 4. – С.33 – 34.

8. Бадамшин, И. Х. Моделирование упругих характеристик нанокompозитов и нанотрубок [Текст] / И. Х. Бадамшин // Композиты и наноструктуры. – 2011. – №1. – С. 18–23.

9. Бадамшин, И. Х. Расчёт упругих, прочностных и теплофизических характеристик монокристаллических сплавов и нанокompозитов, предназначенных для лопаток газовых турбин [Текст] / И. Х. Бадамшин // Авиадвигатели XXI века [Электронный ресурс]: материалы конф.- Электрон. дан.- М.:ЦИАМ, 2010. – 1696 с.

## **THEORETICAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON LATTICE SPACING OF AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINE TURBINE MONOCRYSTALS**

© 2012 I. Kh. Badamshin

Ufa State Aviation Technical University

The possibility of theoretical assessment of monocrystal lattice spacing dependence on temperature is shown. The formula of the dependence is derived. Satisfactory agreement with the results of experiments is obtained. The thermal expansion factor and the modulus of elasticity of eutectic composite components are determined on the basis of the formula derived.

*Eutectic composite, monocrystal, lattice spacing, thermal expansion factor, modulus of elasticity.*

### **Информация об авторе**

**Бадамшин Ильдар Хайдарович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: [adbadamshin@ugatu.ac.ru](mailto:adbadamshin@ugatu.ac.ru). Область научных интересов: испытания и прочность авиационных ГТД.

**Badamshin Ildar Khaidarovich**, doctor of technical sciences, associate professor, professor of aircraft engines department, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: [adbadamshin@ugatu.ac.ru](mailto:adbadamshin@ugatu.ac.ru). Area of research: testing and strength analysis of aircraft engines.

## СТЕСНЁННЫЙ ИЗГИБ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ КРИВОЛИНЕЙНЫХ БОРТОВ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

© 2012 В. А. Барвинок, А. Д. Комаров, В. Г. Кулаков,  
В. К. Моисеев, А. А. Шаров

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Приведены сведения о разработках и исследованиях процесса стеснённого изгиба прямолинейных и криволинейных в плане бортов листовых деталей эластичной средой. Дано описание технических решений, защищённых патентами и свидетельством на изобретения Российской Федерации. Рассмотрено определение рабочего давления эластомера для реализации стеснённого изгиба криволинейных бортов полиуретаном в контейнере с замкнутым объёмом.

*Стеснённый изгиб, эластомер, листовая заготовка, давление, полиуретан, контейнер, прямолинейный борт, криволинейный борт, пружинение.*

Большую номенклатуру деталей каркасов самолётов, вертолётов и других летательных аппаратов изготавливают из листового материала штамповкой и гибкой эластичной средой — полиуретаном. Эти детали имеют прямолинейные или криволинейные борта обычно выпуклой формы в плане, которые служат для соединения с обшивкой или с другими деталями каркаса летательных аппаратов.

При гибке эластичной средой после снятия давления борт детали отпружинивает от гибочной оправки — формблока, величина угла борта изменяется. Для доводки угла борта до требуемой величины после гибки приходится вручную выполнять подгоночные работы. Для исключения или значительного уменьшения этих работ необходимо изготавливать формблоки с углами поднутрения, соответствующими углам пружинения бортов детали. Углы пружинения рассчитывают обычно по формулам из работы [1] или определяют по диаграммам, приведённым в работах [2,3].

Однако при корректировке углов формблоков на величину пружинения разброс механических свойств материалов заготовок и их толщин в пределах допуска приводит к нестабильным результатам. На кафедре производства ле-

тательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета разработаны способы уменьшения и стабилизации пружинения деталей при гибке эластичной средой, которые позволяют изгибать детали практически с требуемой точностью на гибочных оправках без корректировки их на величину пружинения [4]. Но все эти процессы требуют многократного воздействия на заготовку силовых факторов — многократной правки или нескольких последующих переформовок, в результате которых повреждаются поверхностные слои деталей. При этом в зонегиба материал утоняется, что значительно снижает жёсткость и прочность деталей. Это особенно опасно при пульсирующих и знакопеременных нагрузках, с которыми работают практически все детали планера летательного аппарата.

При увеличении радиусагиба утонение материала уменьшается. Но такое увеличение радиусагиба приводит к уменьшению жёсткости детали и увеличению её массы, так как ширина борта определяется требуемым размером для постановки крепёжного элемента и при увеличении радиусаизгиба высоту борта необходимо увеличивать.

Известно, что метод стеснённого изгиба листового материала позволяет

получать детали с очень малыми радиусамигиба [5, 6]. При этом в зонегиба материал утолщается и пружинениезначительно уменьшается. Особенноэффективен способ стеснённого изгиба сдополнительным радиальным давлениеми локализацией очага пластическойдеформации в угловой зоне [7]. Однако для всех разработанных способов стеснённого изгиба требуются специальноеоборудование и трудоёмкая оснастка.

В СГАУ разработан новый способ стеснённого изгиба, осуществляемый на традиционных прессах, оснащённых контейнерами для штамповки эластичной средой на обычных гибочных оправках. При этом стеснённый изгиб может производиться для деталей как с прямолинейными, так и с криволинейными бортами [8]. Один из способов такой штамповки реализован в «Устройстве для штамповки эластичной средой», на которое получен патент [9]. Схема реализации этого способа стеснённого изгиба полиуретаном представлена на рис. 1.

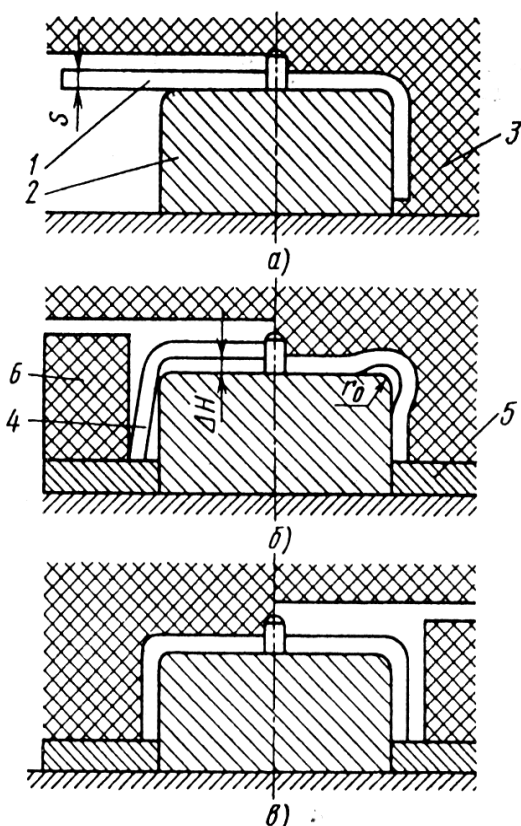


Рис. 1. Схема устройства для стеснённого изгиба эластичной средой с подпорами

Стеснённый изгиб на этом устройстве производится за два перехода. Вна-

чале (рис. 1, а) заготовка 1 изгибается по гибочной оправке 2 под действием давления эластичной среды 3, заключённой в контейнер (условно не показан). Затем под торец изогнутого борта заготовки 4 (рис. 1, б) устанавливается опорная пластина 5 для создания определённого зазора  $\Delta H$  между верхней плоскостью гибочной оправки и стенкой заготовки (рис. 1, б, слева). Для предотвращения потери устойчивости изогнутого борта заготовки 4 на опорную пластину 5 ставятся эластичные подпоры 6. Под действием давления эластичной среды стенка заготовки вначале прогибается в центральной части, а затем образуется волна избыточного материала в зоне скругления гибочной оправки с радиусом  $r_0$  (рис. 1, б, справа). При дальнейшем увеличении давления эластичной среды волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки (рис. 1, в). В результате толщина заготовки в зоне радиусагиба увеличивается, а пружинение борта уменьшается за счёт изменения схемы напряжённо-деформированного состояния материала.

Кроме того, описываемая схема штамповки полиуретаном позволяет для деталей с угломгиба в  $90^\circ$  обходиться одним гибочным пуансоном для левой и правой деталей, так как пуансон 2 не дорабатывается на угол пружинения и может быть просто перевернут в процессе штамповки, так же переворачиваются и опорные пластины 5. Такая особенность этого процесса позволяет значительно сократить расходы на технологическую оснастку при сохранении качества – углагиба, обусловливаемого особенностью стеснённого изгиба, при котором материал заготовки принимает форму конечной детали в результате пластического деформирования под действием тангенциальных и радиальных сжимающих напряжений. Всё это, кроме ресурсосбережения и повышения точностигиба, может позволить уменьшить и радиусизгиба, что также является актуальной задачей, так как при этом повышается жёсткость деталей и снижается их масса в результате уменьшения необходимой для крепежа высоты борта.

Разработаны и запатентованы также устройства для стеснённого изгиба за один переход [10,11], схемы которых представлены на рис. 2. В устройстве с подпружиненной оправкой (рис. 2, а) при перемещении контейнера 2 под действием давления эластичной среды 1 заготовка изгибается по оправке 3, а пружина 4 сжимается (рис. 2, а, позиция 2).

При дальнейшем увеличении давления эластичной среды пружина будет сжиматься в большей степени, гибочная оправка опустится, торцы изогнутых бортов упрутся в подштамповую плиту 5 и в зоне радиусагиба образуется волна избыточного материала (рис. 2, а, позиция 3). При достаточном давлении эластичной среды 1 волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки с образованием утолщения в этой зоне (рис. 2, а, позиция 4).

В устройстве с накладками (рис. 2, б) при опускании контейнера 4 с эластичной средой 3 накладки 5 изгибают борта заготовки с образованием волны избыточного материала с вершиной над средней частью гибочной оправки 1 (рис. 2, б, позиция 2). С увеличением усилия прессы, а следовательно и давления эластичной среды 3, вершина волны прогибается и избыточный материал перемещается в зоны радиусов гибочной оправки (рис. 2, б, позиция 3). Затем происходит посадка материала избыточных волн с образованием утолщения в зоне радиусагиба (рис. 2, б, позиция 4).

При штамповке деталей по разработанным схемам необходимо рассчитать высоту изгибаемых бортов так, чтобы создать необходимую высоту волны избыточного материала  $\Delta H$  и давление полиуретана, достаточное для осуществления процесса.

Давление эластичной среды в контейнере, необходимое для изгиба прямых или криволинейных бортов

выпуклой или вогнутой формы, в плане рассчитывают по формуле [12]

$$q = \frac{\sigma_b s_0^2}{2(H - r_0 - s_0)^2} + \frac{(\sigma_{0,2} + \sigma_b) s_0}{2R}, \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  — предел прочности и условный предел текучести материала заготовки;  $H$  — высота изгибаемого борта;  $r_0$  — радиус ребра гибочной оправки;  $s_0$  — толщина стенки детали;  $R_0$  — радиус кривизны выпуклого или вогнутого борта.

Для расчёта необходимого давления при изгибе прямолинейных бортов, у которых  $R = \infty$ , в вычислениях используют только первое слагаемое формулы (1).

Определение давления эластомера, необходимого для обжима волны избыточного материала в случае прямолинейного борта, проведено в работе [13]. Определение давления эластичной среды, необходимого для обжима волны избыточного материала в случае криволинейного борта, можно провести, считая эту зону элементом торовой поверхности (рис. 3). Усилия в нагруженной постоянным давлением торовой оболочке, определяемые из условия равновесия сегмента оболочки, получены в работе [14]. Из этой работы следует, что напряжения в тангенциальном и меридиональном направлениях описываются зависимостями

$$\sigma_\theta = -\frac{qr}{2S} \cdot \frac{2(R-r) + r \sin \theta}{R-r+r \sin \theta}, \quad (2)$$

$$\sigma_m = -\frac{qr}{2S}. \quad (3)$$

В направлении радиуса  $r$  напряжения меняются от  $-q$  на наружной поверхности до нуля на внутренней поверхности по некоторому закону

$$\sigma_r = -f(q).$$

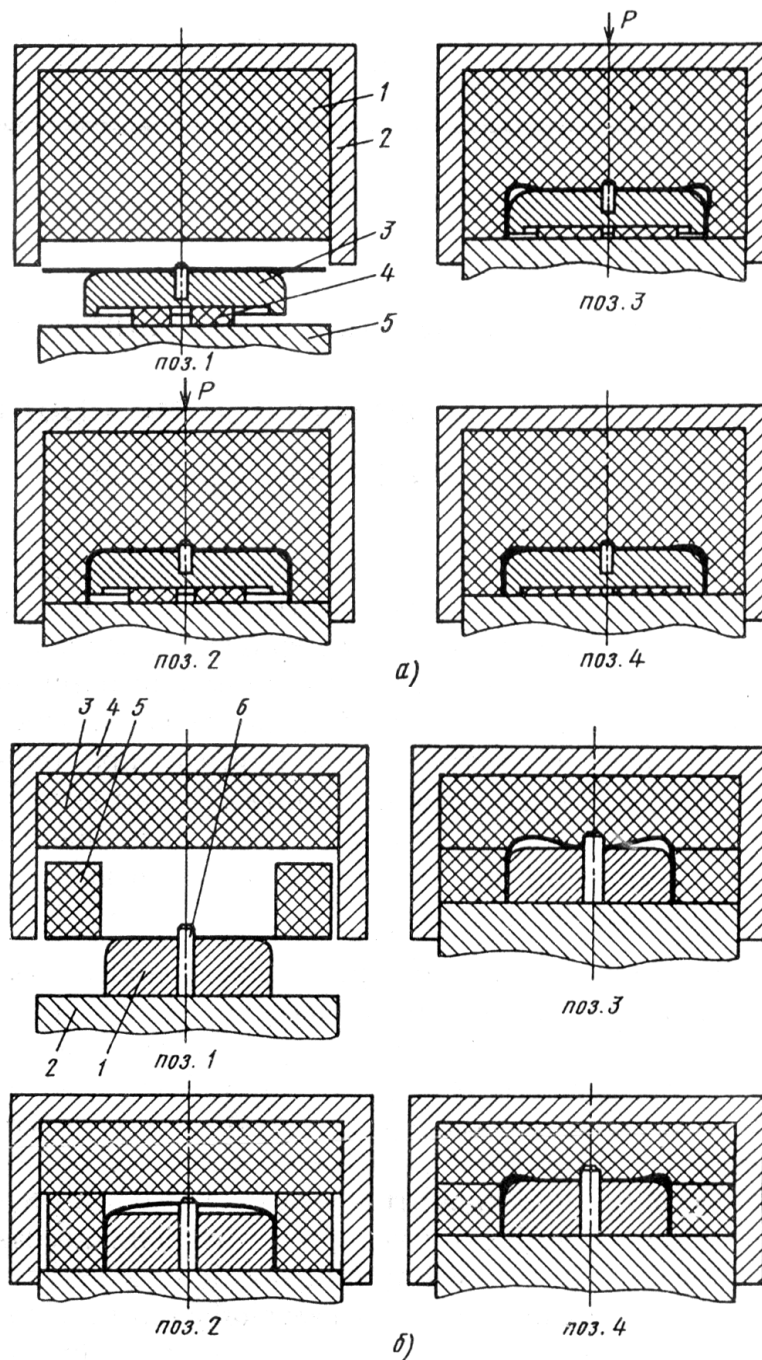


Рис. 2. Схемы устройств для стеснённого изгиба эластичной среды с подпружинённой оправкой (а) и накладками (б)

Из рис. 3 видно, что угол  $q$  изменяется от нуля до  $\pi/2$ , т.е. в выражении (2) всегда  $r \sin \theta > 0$ . Так как  $R > r$  по определению, то из сравнения выражений (2) и (3) следует, что по абсолютной величине  $|\sigma_\theta| > |\sigma_m|$ . Для рассматриваемых деталей  $r > 2S$  (в частности, типовым соотношением является  $r=3S$ ), поэтому  $|\sigma_m| > |\sigma_r|$ . Таким образом, с учётом знака (а все эти напряжения являются сжимающими), главными напряжениями следует считать:

$$\sigma_1 = \sigma_r = -f(q);$$

$$\sigma_2 = \sigma_m = -\frac{qr}{2S};$$

$$\sigma_3 = \sigma_\theta = -\frac{qr}{2S} \cdot \frac{2(R-r) + r \sin \theta}{R-r + r \sin \theta}.$$



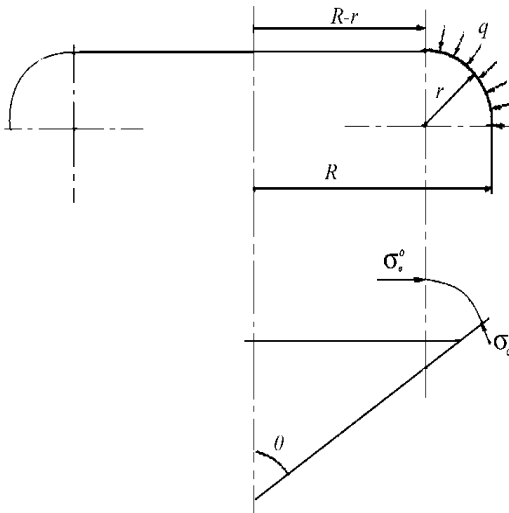


Рис. 3. Торový элемент зоны стеснённого изгиба

Известно, что условием пластичности является неравенство

$$\sigma_i \geq \sigma_s, \quad (4)$$

где  $S_i$  – интенсивность напряжений,  $S_s$  – предел текучести материала.

В общем случае

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Однако с большой степенью точности (ошибка не более 8% [15], что вполне допустимо для технологических расчётов) можно принять

$$\sigma_i = 0,933(\sigma_1 - \sigma_3). \quad (5)$$

Подставив в выражение (5) значения главных напряжений  $S_1$  и  $S_3$ , легко получить, что

$$\sigma_i = 0,933 \left( -fq + \frac{qr}{2S} \cdot \frac{2(R-r) + r \sin \theta}{R-r+r \sin \theta} \right) \quad (6)$$

Так как интенсивность напряжений является величиной переменной, то в выражении (4)  $S_i$  должно иметь минимальное значение, т.е. для полного формообразования детали необходимо выполнение соотношения

$$\sigma_{i \min} \geq \sigma_s. \quad (7)$$

Учитывая, что  $\sigma_1 = -f(q)$  изменяется от нуля до  $-q$ , можно сделать вывод,

что меньшее значение интенсивность напряжений принимает при  $\sigma_1 = -q$ .

Интенсивность напряжений, зависящая от угла  $q$ , должна иметь меньшее значение при  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , так как при этом угле оболочка имеет наибольшую кривизну. Для того, чтобы убедиться в этом, следует исследовать функцию (6) на экстремум, а конкретнее, необходимо определить угол  $q$ , при котором первая производная равна нулю, и знак второй производной в этой точке положителен.

Первая производная

$$\sigma_i' = 0,933 \frac{qr}{2S} \times \frac{r \cos \theta (R-r+r \sin \theta) - r \cos \theta (2R-2r+r \sin \theta)}{(R-r+r \sin \theta)^2} = 0, \quad (8)$$

откуда

$$Rr \cos \theta - r^2 \cos \theta + r^2 \cos \theta \sin \theta - 2Rr \cos \theta + 2r^2 \cos \theta - r^2 \sin \theta \cos \theta = 0$$

или

$$r \cos \theta (r - R) = 0,$$

$$\text{т.е. } \cos \theta = 0 \text{ и } \theta = \frac{\pi}{2}.$$

Вторая производная

$$\sigma_i'' = 0,933 \frac{qr}{2S(R-r+r \sin \theta)^4} \times \left\{ -r \sin \theta (R-r+r \sin \theta) + r \cos \theta \cdot r \cos \theta - \left[ -r \sin \theta (2R-2r+r \sin \theta) + r \cos \theta \cdot r \cos \theta \right] \right\} (R-r+r \sin \theta)^2 - \left[ r \cos \theta (R-r+r \sin \theta) - r \cos \theta (2R-2r+r \sin \theta) \right] \times 2(R-r+r \sin \theta) \cdot r \cos \theta.$$

$$\text{В точке } \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$\sigma_i'' = 0,933 \frac{qr}{2S} \cdot \frac{\{[-r(R-r)] - [-r(2R-2r+r)]\} R^2}{R^4} = 0,933 \frac{qr}{2S} \cdot \frac{(-rR+r^2+2Rr-r^2) R^2}{R^4} =$$

$$= 0,933 \frac{qr}{2S} \cdot \frac{R \cdot r \cdot R^2}{R^4} = 0,933 \frac{qr^2}{2SR} > 0.$$

Отсюда следует, что функция (6) имеет локальный минимум в точке  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , что и требовалось доказать.

Таким образом, при значении угла  $\theta = \frac{\pi}{2}$  интенсивность напряжений будет иметь минимальное значение:

$$\begin{aligned} \sigma_{i \min} &= 0,933 \left( -q + \frac{qr}{2S} \cdot \frac{2(R-r) + r \sin \frac{\pi}{2}}{R-r+r \sin \frac{\pi}{2}} \right) = \\ &= 0,933 \left( -q + \frac{qr}{2S} \cdot \frac{2R-2r+r}{R-r+r} \right) = \\ &= 0,933q \left( \frac{r}{2S} \cdot \frac{2R-r}{R} - 1 \right) = \\ &= 0,933q \left( \frac{r(2R-r)}{2SR} - 1 \right) = 0,933q \left( \frac{2Rr-r^2}{2SR} - 1 \right) = \\ &= 0,933q \left( \frac{2Rr-r^2-2SR}{2SR} \right). \end{aligned}$$

Из условия пластичности (7) с учётом найденного выражения для  $\sigma_{i \min}$  следует:

$$0,933q \left( \frac{2Rr-r^2-2SR}{2SR} \right) \geq \sigma_s,$$

откуда величина давления эластомера, необходимого для обжима волны избыточного материала

$$\begin{aligned} q &\geq \frac{2SR\sigma_s}{0,933(2Rr-r^2-2SR)} = \\ &= \frac{2,14SR}{2Rr-r^2-2SR} \sigma_s. \end{aligned} \quad (9)$$

На практике зона изгиба практически всегда значительно нагартована, поэтому для технологических расчётов следует в этой формуле принимать  $S_s = S_B$ , а для деталей, отжигаемых перед обжимом,  $S_s = S_{02}$ .

Для точности расчётов в случае штамповки тонкостенных деталей с относительно большой толщиной необходимо за радиусы  $R$  и  $r$  принимать радиу-

сы кривизны срединной поверхности.

Из формулы (6) можно получить функцию распределения давления, необходимого для пластического формоизменения, по контуру зоны обжима.

Принимая во внимание, что для минимального значения интенсивности напряжений следует считать  $S_1 = -q$ , из выражения (6) с учётом неравенства (7), получим

$$q = \frac{2S\sigma_s(R-r+r \sin \theta)}{0,933[r(2R-2r+r \sin \theta) - (R-r+r \sin \theta)2S]}.$$

На рис. 4 представлен пример такого распределения для детали из алюминиевого сплава АМцМ (размеры указаны на рисунке) при  $S_s = S_B$ .

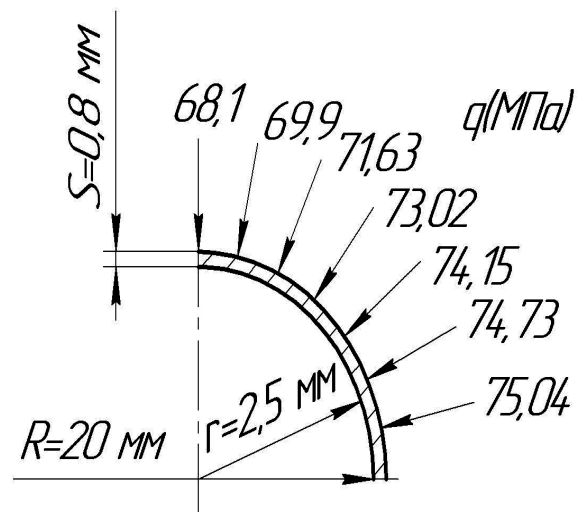


Рис. 4. Распределение давления, необходимого для обжима волны избыточного материала, по контуру зоны обжима

Из рисунка следует, что разница между наибольшим и наименьшим необходимым давлением составляет примерно 10%, наибольшее давление составляет около 75 МПа, требуется в точке с углом  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , что было показано выше, и его следует принимать за расчётное для определения усилия прессового оборудования.

### Выводы

1. Разработан новый ресурсосберегающий способ стеснённого изгиба полиуретаном деталей различного наружного контура в плане.

2. Разработана методика расчёта рабочего давления полиуретана.

3. Детали, полученные стеснённым изгибом, обладают более высокими значениями надёжности, ресурса, жёсткости и точности.

### Библиографический список

1. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов [Текст] / В. А. Барвинок, А. Н. Кирилин, А. Д. Комаров [и др.] – М.: Наука и технологии, 2002. – 394с.

2. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский: 6-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, - 1979. - 520 с.

3. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка [Текст] / М. Е. Зубцов: 3-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, - 1980. - 432 с.

4. Комаров, А. Д. Способы уменьшения и стабилизации пружинения деталей при гибке эластичной средой [Текст] / А. Д. Комаров, А. А. Шаров, В. К. Моисеев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1993.-№7.-С. 13-16.

5. Проскураков, Г. В. Стеснённый изгиб [Текст] / Г. В. Проскураков // Авиационная промышленность. - 1963. - № 12. - С. 9—13.

6. Колганов, И. М. Формообразование листовых профилей повышенной жёсткости при волочении [Текст] / И. М. Колганов, Г. В. Проскураков, В. И. Колганов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1982. -№5. - С. 21—23.

7. Разработка и исследование процесса гибки профилей и панелей методом проглаживания [Текст] / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников, Г. В. Коновалов [и др.] // Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и товаров народного потребления: материалы

конф. - Пенза, 1991. – С. 202-207.

8. Комаров, А. Д. Технология гибки полиуретаном деталей повышенной точности, надёжности и ресурса [Текст] / А. Д. Комаров, А. А. Шаров, В. К. Моисеев // Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка для холодноштамповочного производства: тез. докл. на II Всесоюз. науч.-техн. конф. - Пенза, 1994. - С. 6—8.

9. Свидетельство № RU 1647, МКИ<sup>6</sup>В21D22/10. Устройство для штамповки эластичной средой [Текст]/ А. Д. Комаров, А. А. Шаров, В. К. Моисеев [и др.] (РФ). – №94025900/08; заявл. 12.07.94; опубл. 16.02.96, Бюл. №2.-2 с.

10. Пат. RU 2089312, МКИ<sup>6</sup> В21D22/10. Устройство для штамповки эластичной средой [Текст] / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. А. Шаров, [и др.] (РФ) – №95102196/02; заявл. 15.02.95; опубл. 10.09.97, Бюл. №25.-2 с.

11. Пат. RU 2089313, МКИ<sup>6</sup> В21D22/10. Устройство для штамповки эластичной средой [Текст] / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. А. Шаров, В. К. Моисеев [и др.] (РФ) – №95102197/02; заявл. 15.02.95; опубл. 10.09.97, Бюл. №25.-2 с.

12. Комаров, А. Д. Достижения в области освоения в производстве новых процессов штамповки эластичной средой в условиях конверсии [Текст] / А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, А. А. Шаров // Эффективные технологические процессы листовой штамповки: материалы семинара. - М.: ЦРДЗ, 1993. - С. 66—72.

13. Бидерман, В. Л. Механика тонкостенных конструкций [Текст] / В. Л. Бидерман. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.

14. Пономарёв, С. Д. Расчёты на прочность в машиностроении [Текст] / С. Д. Пономарёв, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев [и др.] – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2 – 974 с.

## CRAMPED BENDING OF SHEET METAL PIECE CURVED SIDES WITH AN ELASTIC MEDIUM

©2012 V. A. Barvinok, A. D. Komarov, V. G. Kulakov,  
V. K. Moissejev, A. A. Sharov

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The paper presents data on the development and research of the process of cramped bending of straight and curved sides of sheet workpieces by an elastic medium. A description of design protected by patents and an invention certificate of the Russian Federation is given. The elastomer working pressure is determined for the implementation of curved side cramped bending by polyurethane in a closed-volume container.

*Cramped bending, elastomer, sheet workpiece, pressure, polyurethane, container, straight side, curved side, springing.*

### Информация об авторах

**Барвинок Виталий Алексеевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Область научных интересов: технология производства летательных аппаратов.

**Комаров Анатолий Дмитриевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Область научных интересов: технология листовой штамповки эластомерами.

**Кулаков Виктор Геннадьевич**, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Область научных интересов: стеснённый изгиб эластомерами.

**Моисеев Виктор Кузьмич**, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Область научных интересов: технология листовой штамповки эластомерами.

**Шаров Андрей Алексеевич**, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Область научных интересов: стеснённый изгиб эластомерами.

**V. A. Barvinok**, Dr. Sc., professor, head of the department of aircraft production and quality control in mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (national research university). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Area of research: technology of aircraft production.

**A. D. Komarov**, candidate of technical science, professor, department of aircraft production and quality control in mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolev (national research university). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Area of research: technology of sheet forming by elastomers.

**V. G. Kulakov**, post-graduate student of the department of production of aircraft and quality control in mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (national research university). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Area of research: technology of sheet forming by elastomers.

**V. K. Moiseyev**, Dr. Sc., professor, department of aircraft production and quality control in mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (national research university). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Area of research: technology of sheet forming by elastomers.

**A. A. Sharov**, candidate of technical science, assistant professor of the department aircraft production and quality control in mechanical engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (national research university). E-mail: [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru). Area of research: technology of sheet forming by elastomers.

УДК 62-752.2

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ МАНОМЕТРОВ**© 2012 А. Г. Гимадиев<sup>1</sup>, А. А. Гимадиев<sup>2</sup>, А. З. Ермошкин<sup>2</sup>, В. Н. Илюхин<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>ООО Научно-производственное предприятие «Гималаи»

Разработан гаситель колебаний давления для электроконтактных манометров (ЭКМ), позволяющий измерять наибольшее (наименьшее) значения пульсирующего давления при сохранении быстродействия измерительной цепи. Теоретическими и экспериментальными исследованиями гасителя в составе ЭКМ на гидравлическом оборудовании подтверждена заданная его эффективность.

*Электроконтактный манометр, пульсации давления, гаситель колебаний, динамические характеристики, эффективность гасителя.*

Одной из важных задач, возникающих при эксплуатации систем смазки опор электрических генераторов, гидравлического оборудования, топливных систем и других установок, является обеспечение надёжного срабатывания систем защиты от превышения сверх допустимой нормы или сброса давления. Чувствительным элементом таких систем во многих случаях является ЭКМ, формирующий сигнал для выключения агрегатов или подключения резервных источников давления. Давление в гидравлических системах наряду со средним значением содержит пульсационную составляющую, обусловленную неравномерной подачей насосов, неустойчивой работой агрегатов и другими причинами. Пульсации давления часто приводят к ложному срабатыванию ЭКМ. Применение традиционных гасителей в виде дросселей, акустических РС – фильтров [1-3] позволяет снизить уровень пульсаций давления в полости манометра, однако при этом происходит также запаздывание в передаче сигнала, причём оно тем больше, чем выше эффективность гасителя. Запаздывание в срабатывании ЭКМ может привести к аварийным ситуа-

циям, особенно при превышении давления в системах выше допустимого уровня.

В работе исследуется демпфирующее устройство (гаситель) [4] для ЭКМ, состоящий из байпасно соединённых обратного клапана и гидравлического дросселя (рис. 1). Обратный клапан может устанавливаться на режим накачки (рис. 1,а) или откачки (рис. 1,б) давления. При первой схеме установки манометр будет показывать наибольшее значение из реализующегося пульсирующего давления, то есть их «верхушки», а при второй установке – нижний край колебательного процесса.

Гаситель колебаний с накачкой применяется в ЭКМ для сигнализации превышения давления, а откачки – для сигнализации сброса давления в системе. Однако широкое применение гасителей для ЭКМ сдерживается отсутствием методик их расчёта и недостаточным исследованием их характеристик. В статье предлагается решение этих задач.

При расчёте гасителя предполагается, что источником давления, к напорной магистрали которого подключён манометр с гасителем, является плунжерный или шестерённый насос.

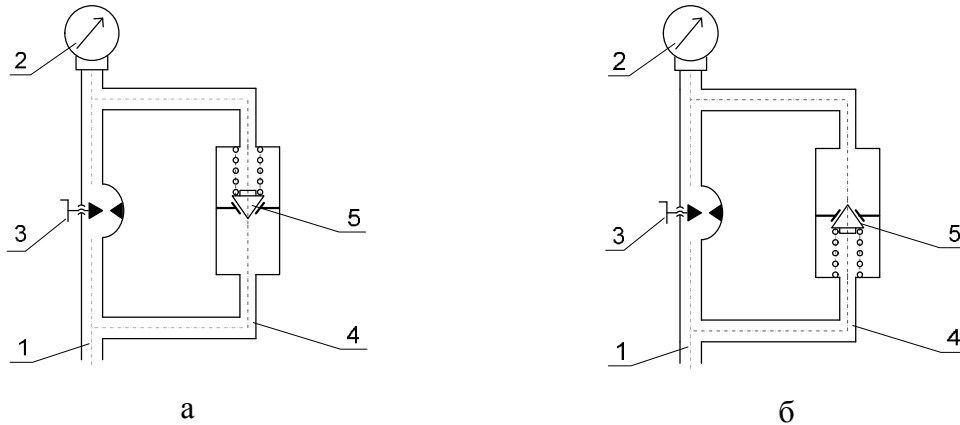


Рис. 1. Принципиальные схемы гасителя колебаний давления для электроконтактных манометров (а – для случая накачки давления; б – для случая откачки давления); 1 – импульсная трубка; 2 – электроконтактный манометр; 3 – дроссель; 4 – байпасный канал; 5 – обратный клапан

Давление в гидравлической системе в общем случае описывается зависимостью

$$P_{zc}(t) = P_{zc0} + \sum_{r=1}^{r=R} A_{zc}^{(r)} \sin(\omega_r t + j_r), \quad (1)$$

где  $P_{zc0}$  - постоянная составляющая давления;  $A_{zc}^{(r)}$ ,  $\omega_r$ ,  $j_r$  - амплитуда, частота и начальная фаза  $r$ -ой составляющей колебаний давления соответственно;  $t$  - время.

Одноплунжерный гидравлический насос-дозатор является источником колебаний расхода, который создаёт в гидравлической системе давление, которое можно приближенно аппроксимировать формулой

$$P_{zc}(t) = \begin{cases} P_{zc0} & \text{при } 0 < y < j, \\ P_{zc0} + A_{zc} \sin y & \text{при } (p-j) \leq y \leq 2p, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_{zc}$  - амплитуда колебаний давления;  $j = \arcsin(P_{zc0}/A_{zc})$ ;  $y = \omega t$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  - циклическая частота.

В системе защиты с ЭКМ подводящий или импульсный трубопровод по длине выбирают как можно короче. Поэтому на передачу колебаний давления от гидравлической системы к манометру он не оказывает существенного влияния. Для упрощения расчётов предположим, что

ЭКМ с гасителем подсоединён непосредственно к трубопроводу гидравлической системы.

При выводе уравнения обратного клапана гасителя предположим, что инерционные силы, действующие на него, малы по сравнению с силой от перепада давления. При перепаде давления выше противодавления со стороны пружины клапан мгновенно занимает открытое положение и наоборот. Движение жидкости через клапан турбулентное, квазистационарное. При таких допущениях обратный клапан можно описать зависимостью:

$$Q_{кл} = \begin{cases} (mF)_{кл} \sqrt{2\Delta P / r} & \text{при } \Delta P > \Delta P_{np}; \\ 0 & \text{при } \Delta P \leq \Delta P_{np} \end{cases} \quad (3)$$

для гасителя с накачкой давления ( $\Delta P_{np} > 0$ );

$$Q_{кл} = \begin{cases} (mF)_{кл} \sqrt{2\Delta P / r} & \text{при } \Delta P < \Delta P_{np}; \\ 0 & \text{при } \Delta P \geq \Delta P_{np} \end{cases} \quad (4)$$

для гасителя со сбросом давления ( $\Delta P < \Delta P_{np}$ ).

Здесь  $Q_{кл}$  - объёмный расход жидкости через клапан;  $(mF)_{кл}$  - эффективная площадь проходного сечения клапана в открытом положении;  $r$  - плотность рабочей среды;  $\Delta P$  - перепад давления на

клапане;  $\Delta P_{np}$  - противодействие со стороны предварительно поджатой пружины.

В качестве дросселирующего элемента в гасителях колебаний давления применяют регулируемые и нерегулируемые гидравлические дроссели, капиллярные трубки. Расход  $Q_o$  и перепад давления  $\Delta P$  в них связаны зависимостями:

$$Q_o = (mF)_o \sqrt{2\Delta P / r} \quad (5)$$

для нелинейного гидравлического дросселя и

$$L_{кан} \frac{dQ_{кан}}{dt} + k_{кан} Q_{кан} = \Delta P \quad (6)$$

для капиллярного канала.

Здесь  $Q_o$ ,  $Q_{кан}$  - объёмный расход жидкости через гидравлический дроссель и капиллярный канал;  $(mF)_o$  - эффективная площадь проходного сечения гидравлического дросселя;  $L_{кан} = r l_{кан} / F_{кан}$  - акустическая индуктивность капиллярной трубки;  $l_{кан}$ ,  $F_{кан}$  - длина и площадь проходного сечения капиллярной трубки соответственно;  $k_{кан} = 128 r n l_{кан} / (p d_{кан}^4)$  - гидравлическое сопротивление капиллярной трубки диаметром  $d_{кан}$ ;  $n$  - кинематическая вязкость жидкости.

Объёмный расход жидкости с выхода байпасно соединённого обратного клапана и дросселирующего элемента в виде нелинейного дросселя ( $Q_{оэ} = Q_o$ ) или капиллярного канала ( $Q_{оэ} = Q_{кан}$ ) равен расходу жидкости в рабочую полость гасителя и манометра  $Q_m$ :

$$Q_m = Q_{кл} + Q_{оэ} \quad (7)$$

Расход жидкости  $Q_m$ , затрачиваемый на создание давления  $P_m$  в полостях гасителя и манометра, определяется по зависимости

$$Q_m = \frac{V_{np}}{rc^2} \frac{dP_m}{dt} \quad (8)$$

где  $V_{np}$  - суммарный приведённый объём полости гасителя и манометра;  $c$  - скорость распространения звука в жидкости.

При пульсирующем давлении на входе в гаситель (1) давление в полости манометра  $P_m(t)$  в общем случае будет также пульсирующим:

$$P_m(t) = P_{m0} + \sum_{n=1}^{n=N} A_{pm}^{(n)} \sin(\omega_n t + g_n), \quad (9)$$

где  $P_{m0}$  - постоянная составляющая давления в полости манометра;  $A_{pm}^{(n)}$ ,  $\omega_n$ ,  $g_n$  - амплитуда, частота и начальная фаза  $n$ -ой составляющей колебаний давления, соответственно.

Для случая полигармонического колебательного процесса в источнике эффективность гасителя колебаний давления оценивается по отношению среднеквадратичного или эффективного значения давлений в источнике и в рабочей полости манометра

$$K_{эф} = \frac{P_{zc}^{(эф)}}{P_m^{(эф)}}, \quad (10)$$

где  $P_{zc}^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{r=1}^{r=R} [A_{zc}^{(r)}]^2}$  - эффективное значение колебаний давления в источнике;

$P_m^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=N} [A_m^{(n)}]^2}$  - эффективное значение колебаний давления в полости манометра.

Если источником давления является одноплунжерный насос, то эффективное значение колебаний давления в источнике и рабочей полости манометра следует определять по зависимостям:

$$P_{zc}^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} \frac{1}{2} [P_{zc}(t) - P_{zc0}]^2 dt};$$

$$P_m^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} \frac{1}{2} [P_m(t) - P_{m0}]^2 dt}, \quad (11)$$



где  $T_u$  - время интегрирования колебательного процесса.

При разработке гасителя для ЭКМ, в первую очередь, следует оценивать эффективность  $K_{эф}$ , от величины которого зависит исключение ложного срабатывания манометра и, во вторую очередь, – насколько будет отличаться постоянная составляющая  $P_{м0}$  от  $P_{с0}$ . При резком изменении давления в источнике по тем или иным причинам время нарастания (спада) давления в полости ЭКМ будет зависеть от площади проходного сечения обратного клапана гасителя и приведённого объема полости манометра. Так как площадь проходного сечения обратного клапана велика по сравнению с сечением дросселирующего элемента, то время, за которое давление в полости манометра достигнет изменённого значения в источнике, будет несущественным. При этом настройку уровня сигнализации ЭКМ следует производить по наибольшему значению пульсирующего давления, на-

блюдающегося в гидравлической системе для гасителя с накачкой или по его наименьшему значению - для гасителя с откачкой.

Теоретическое исследование эффективности гасителя в измерительной цепи с ЭКМ проводилось на основании принятой математической модели цепи, представленной уравнениями (1) – (11). Наличие в измерительной цепи существенно нелинейного элемента (обратного клапана) не позволяет решать уравнения аналитически. Поэтому целесообразно воспользоваться численными методами, реализованными в стандартном пакете программы моделирования Simulink [5]. Для этого необходимо составить модели элементов первого уровня (в соответствии с приведёнными уравнениями), затем объединить их в систему верхнего уровня (рис. 2) и моделировать процессы в измерительной цепи с заданием соответствующих параметров элементов и входного сигнала от источника колебаний давления.

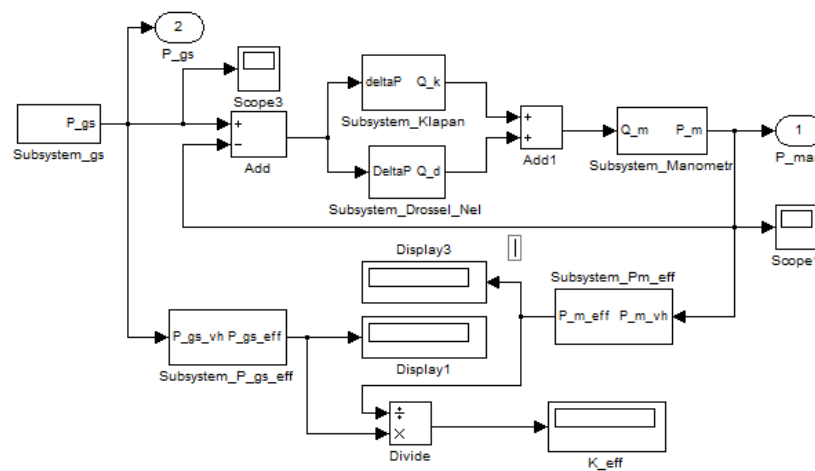


Рис. 2. Модель верхнего уровня в пакете Simulink измерительной цепи с электроконтактным манометром, на входе которого установлен гаситель колебаний давления

Рассмотрим эффективность гасителя колебаний давления с накачкой в измерительной цепи с ЭКМ, подключённой к источнику колебаний в виде одноплунжерного насоса, как создающего наибольший уровень пульсаций. В результате моделирования рабочего процесса в измерительной цепи и на выходе из насоса (рис. 3) стало ясно, что установка гасителя приво-

дит к демпфированию колебаний давления в полости манометра более чем в 10 раз, или эффективность гасителя, определённая по среднеквадратическим значениям, равна  $K_{эф}=11,6$ . Максимальные значения давления в источнике давления и в полости манометра отличаются не более чем на 0,05 МПа, при этом время выхода на это значение в полости манометра

составляет 0,12 с, что вполне допустимо для срабатывания ЭКМ и защиты системы от превышения давления.

Если бы применялся обычный РС – гаситель с тем же гидравлическим дросселем или с той же эффективностью, то максимальное значение давления в полости манометра было бы достигнуто только через 10 с, что не удовлетворило бы требованиям по его быстродействию.

Эффективность гасителя зависит в основном от приведённого объема манометра и гидравлического сопротивления дросселя (рис. 4). Чем выше частота колебаний давления, тем выше эффективность гасителя.

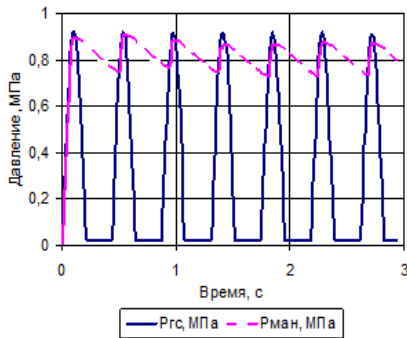


Рис. 3. Оциллограммы изменения давления на выходе из насоса (а) и в рабочей полости манометра (б), полученные в результате моделирования рабочего процесса в измерительной цепи в пакете Simulink:  $f = 2,3$  Гц,  $P_{zс0} = 0$  МПа,  $A_{zс} = 1,14$  МПа,  $c = 1250$  м/с,  $r = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_{np} = 0,013$  м<sup>3</sup>,  $(mF)_d = 0,075e-6$  (Па с)/м<sup>3</sup>,  $\Delta P_{np} = 0,05$  МПа

Экспериментальное исследование эффективности действия гасителя проводилось на установке с одноплунжерным гидравлическим насосом-дозатором (рис. 5). Рабочая среда – техническая вода с температурой не более 40 °С, давление на входе в магистраль до 4,0 МПа. Вода, отбираемая самотёком из бака, подаётся плунжерным насосом под высоким давлением на вход в магистраль с дросселем-имитатором гидравлической системы. Давление в магистрали устанавливалось краном К2, вмонтированным в сливную магистраль.

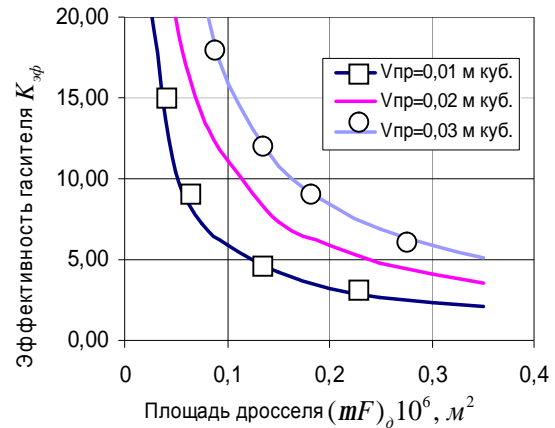


Рис. 4. Зависимость эффективности действия гасителя колебаний давления  $K_{эф}$  от площади проходного сечения дросселя  $(mF)_d$  при амплитуде колебаний давления на входе в манометр  $A_{zс} = 1,0$  МПа с частотой 2,3 Гц и различных приведённых объёмах рабочей полости ЭКМ

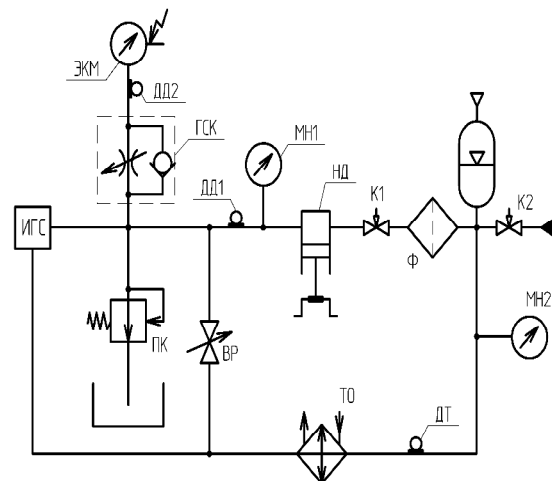


Рис. 5. Гидравлическая схема установки для испытаний эффективности действия гасителя колебаний давления для ЭКМ: ИГС – имитатор контролируемой гидравлической системы; ЭКМ – электроконтактный манометр; ДД1, ДД2 – датчики давления жидкости; ГСК – гаситель колебаний давления в виде байпасно соединённых обратного клапана и регулируемого гидравлического дросселя; МН1, МН2 – технические манометры; К1, К2 – кран перекрывной; Ф – фильтр; ДТ – датчик температуры; ТО – теплообменник

Во время испытаний были использованы датчики давления ЛХ415/40. Один из датчиков давления устанавливался в напорной магистрали (на входе в гаситель), а второй – на выходе из гасителя, т.е. практически в рабочей полости манометра.

метра. Сигнал с выхода датчиков подавался на аппаратуру 4АНЧ-22.

Усиленный сигнал поступал на вход в АЦП с частотой опроса 1 кГц. Обработка сигнала производилась с использованием разработанной в ООО НПП «Гималаи» программы обработки сигналов POVS, позволяющей производить спектральный анализ временных реализаций и определять их эффективные значения.

Анализ эффективности гасителя ГСК60-ВдЭН производства ООО НПП «Гималаи», принципиальная схема которого дана на рис. 1,а, показал, что на выходе из насоса-дозатора реализуется предельное значение давления 1,15 МПа (11,5 кгс/см<sup>2</sup>) и минимальное 0 МПа (0 кгс/см<sup>2</sup>) (рис. 6).

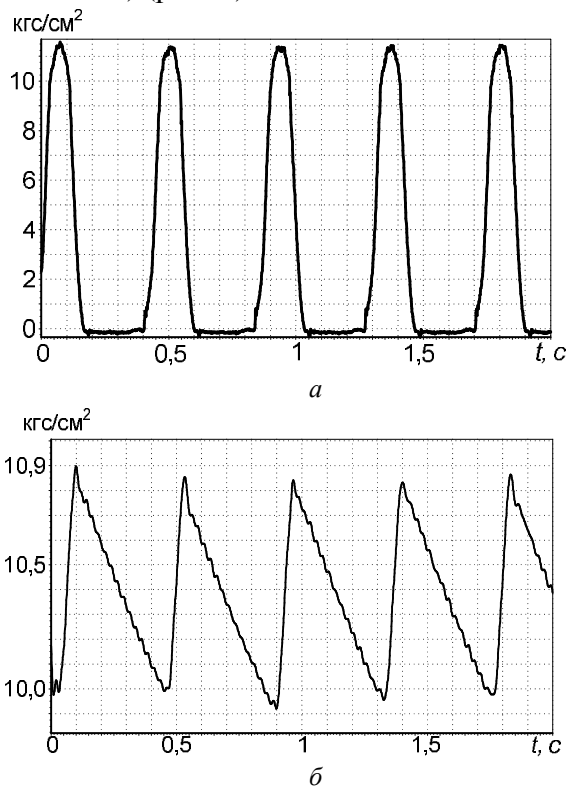


Рис. 6. Осциллограмма давления в месте установки датчика ДД1 на выходе из насоса-дозатора (а) и датчика ДД2 (б) на выходе из гасителя ГСК60ВдЭН (в полости манометра) при максимальной подаче насоса

По показаниям датчика ДД2 наибольшее давление на выходе из гасителя или в полости манометра составило 1,08 МПа (10,8 кгс/см<sup>2</sup>), а минимальное значение составило 0,99 МПа (9,9 кгс/см<sup>2</sup>). Отличие в показаниях предельного значения

манометра и в напорной магистрали равно 0,065 МПа (0,65 кгс/см<sup>2</sup>). При этом эффективность гасителя, определённая по среднеквадратическим значениям, составила  $K_{эф} = 8,6$ . Анализ осциллограммы давления в рабочей полости ЭКМ (рис. 6) показывает, что время нарастания давления в полости манометра меньше, чем время спада, в пять раз. Такой результат подтверждает теоретические зависимости, полученные для тех же условий реализации колебательного процесса в измерительной магистрали (рис. 3).

Таким образом, теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждена работоспособность гасителя для ЭКМ – гасить колебания давления с требуемой эффективностью при сохранении быстродействия прибора. Получены зависимости, по которым можно определить гидравлическое сопротивление гасителя по заданной его эффективности.

Благодарность: Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», выполняемой в рамках мероприятия 1.9 - 1 очередь «Работы по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение» с участием научных и исследовательских организаций стран Европейского Союза».

### Библиографический список

1. 900141 СССР, М. Кл.3 01 19/06. Демпфирующее устройство для манометрических приборов [Текст] / Г. И. Берестнев, А. Г. Гимадиев, В. П. Шорин (СССР). - № 2936094/18-10; Заявл. 29.05.80; Оpubл. 23.01.82, Бюл. № 3.
2. 1435971 СССР, Кл. 01 19/06. Демпфирующее устройство для манометрических приборов [Текст] / Г. И. Берестнев, А. Г. Гимадиев, Л. М. Лапчук, В. П.

Шорин (СССР). - №4141057/24-10; Заявл. 29.10.86; Опубли. 07.11.88, Бюл. №41.

3. Шорин, В. П. Демпфирование колебаний рабочей среды в манометрических магистралях [Текст] / В. П. Шорин, А. Г. Гимадиев, Г. И. Берестнев // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. / Куйбышев, авиац. ин-т. - Куйбышев, 1976. - Вып.3. - С. 134 - 140.

4. Гимадиев, А. А. Демпфирующее устройство для электроконтактных манометров [Текст] / А. А. Гимадиев, А. Г. Гимадиев, А. З. Ермошкин, В. Н. Илюхин – Патент РФ на полезную модель №55127 от 06.02.2006 г.

5. Лазарев, Ю. Ф. MatLAB 5.x [Текст] / Ю. Ф. Лазарев – К.: Издательская группа ВHV, - 2000. – 384 с.

## DESIGN AND RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A PRESSURE FLUCTUATION DAMPING DEVICE FOR ELECTROCONTACT MANOMETERS

© 2012 A. G. Gimadiev<sup>1</sup>, A. A. Gimadiev<sup>2</sup>, A. Z. Ermochkin<sup>2</sup>, V. N. Ilyuchin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>The Gimalai ltd

A shock absorber for electric contact manometers (ECM) has been developed which makes it possible to measure the greatest (smallest) values of pulsating pressure while maintaining the speed of the measuring circuit. Theoretical and experimental analysis of the shock absorber incorporated into an ECM of hydraulic equipment confirmed its preset efficiency.

*Electric contact pressure gauge, pressure pulsation, shock absorber, dynamic characteristics, efficiency.*

### Информация об авторах

**Гимадиев Асгат Гатятович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru). Область научных интересов: динамика пневмогидравлических и топливных систем энергетических установок.

**Гимадиев Азат Асгатович**, директор ООО НПП «Гималаи». E-mail: [gaa@gimalai.com](mailto:gaa@gimalai.com). Область научных интересов: разработка и изготовление гидравлической и газовой арматуры технологического оборудования.

**Ермошкин Алексей Золяевич**, ведущий инженер ООО НПП «Гималаи». E-mail: [eraz@gimalai.com](mailto:eraz@gimalai.com). Область научных интересов: разработка и изготовление гидравлической и газовой арматуры технологического оборудования.

**Илюхин Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru). Область научных интересов: мехатроника и робототехника.

**Gimadiev Asgat Gatyatovich**, Ph.D., professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru). Area of research: pneumohydraulic and power plant fuel system dynamics.

**Gimadiev Azat Asgatovich**, the Gimalai ltd., CEO. E-mail: [gaa@gimalai.com](mailto:gaa@gimalai.com). Area of research: hydraulic and gas production equipment design and manufacture.

**Ermoshkin Alex Zolyaevich**, the Gimalai ltd., chief engineer. E-mail: [eraz@gimalai.com](mailto:eraz@gimalai.com). Area of research: hydraulic and gas production equipment design and manufacture.

**Ilyukhin Vladimir Nikolayevich**, Ph.D., associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru). Area of research: mechatronics and robotics.

УДК 539.214+539.374+548.735.6+621.7.043

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕКСТУРИРОВАННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ЗАГОТОВОК

© 2012 Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Предложен критерий пластичности для расчётов формообразования высокотекстурированных анизотропных заготовок, полученный на основе энергетического критерия пластичности Р. Мизеса с учётом ориентационных факторов текстуры и констант кристаллической решетки.

*Критерий пластичности, анизотропия, параметры текстуры, материальный тензор, ассоциированный закон течения, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, уравнения связи напряжений и деформаций.*

Как известно, такие широко распространённые в производстве аэрокосмической техники полуфабрикаты как листы, ленты, профили, трубы и т.д. обладают явно выраженной анизотропией свойств, являющейся следствием кристаллического строения вещества и последующего его текстурообразования при пластической деформации. Игнорирование этой фундаментальной характеристики материалов в технологических расчётах не только снижает потенциальные деформационные возможности заготовок, но и приводит к целому ряду других нежелательных явлений: повышенному расходу металла, ограничению предельно допустимой деформации, искажению формы, размеров и снижению эксплуатационных параметров продукции. С другой стороны, рациональная анизотропия является серьёзным фактором интенсификации процессов формообразования материалов и повышения эксплуатационных характеристик изделий в определённых направлениях [1,2].

Однако в технологических расчётах процессов формообразования деталей летательных аппаратов, двигателей и других изделий машиностроения до сих пор используются соотношения теории пластичности, основанной на феноменологическом подходе, куда не входят параметры кристаллографической текстуры и кон-

станты кристаллической решётки, являющиеся причиной возникновения анизотропии свойств заготовок. Следовательно нет и основы для непосредственного анализа деформационных возможностей металла в конкретной операции, определения условий формирования и наиболее эффективного использования направленности свойств заготовок. Такие возможности появляются лишь при использовании структурного подхода и аппарата теории пластичности анизотропных сред, в которой критерий пластичности является совместным инвариантом тензора напряжений и материального тензора, учитывающего реальную структуру материала.

В общем случае такой критерий пластичности можно получить, исходя из функции текучести Р. Мизеса [3]:

$$f = S_i^2 = \frac{1}{2} (k_{ijkl} S_{ij} S_{kl} + k_{pq}^{rs} S_{pq}), \quad (1)$$

где  $f$  – функция текучести;  $S_i$  – интенсивность напряжений;  $S_{ij}$  – тензор напряжений;  $k_{pq}^{rs}$  – тензор, учитывающий разницу в пределах текучести сжатия и растяжения;  $k_{ijkl}$  – материальный тензор.

Критерий пластичности (1) может быть использован в самом общем случае анизотропии. Однако для металлов и сплавов в этом нет необходимости, т.к.

листы, ленты, трубы имеют определённую симметрию свойств [4]. Следовательно для использования теории пластичности анизотропных сред при обработке металлов давлением достаточно рассмотреть случай ортотропного тела.

Если пренебречь различием пределов текучести на сжатие и растяжение [5], то функция пластичности (1) в главных осях симметрии ортотропного тела примет следующий вид:

$$f = s_i^2 = \frac{1}{2} K_{ijkl} s_{ij} s_{kl} = \frac{1}{2} \left[ K_{1111} s_{11}^2 + K_{2222} s_{22}^2 + K_{3333} s_{33}^2 + 2(K_{1122} s_{11} s_{22} + K_{2233} s_{22} s_{33} + K_{3311} s_{33} s_{11}) + 4(K_{1212} s_{12}^2 + K_{2323} s_{23}^2 + K_{3131} s_{31}^2) \right], \quad (2)$$

где  $K_{ijkl}$  – компоненты материального тензора в главных осях анизотропии.

Компоненты  $K_{ijkl}$  могут быть представлены с точностью до постоянного множителя через компоненты тензора податливости  $S_{ijkl}$  [6]:

$$K_{ijkl} = h \left[ S_{ijkl} - \frac{1}{3} d_{ij} d_{kl} (S_{ii11} + S_{ii22} + S_{ii33}) \right], \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент пропорциональности;  $d_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$  – символ Кронекера.

Для определения компонент тензора податливости  $S_{ijkl}$  по известным значениям констант кристаллической решетки  $S'_{ijkl}$  и ориентационных факторов текстуры  $\Delta_i$  воспользуемся существующими зависимостями для упругой среды [7]:

$$\begin{aligned} S_{iiii} &= S'_{1111} - 2S'\Delta_i, \\ S_{ijij} &= S'_{2323} + 4S'(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k), \\ S_{iijj} &= S'_{1122} + 2S'(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k), \\ S' &= S'_{1111} - S'_{1122} - \frac{1}{2} S'_{2323}. \end{aligned} \quad (4)$$

После ряда преобразований получим отношение компонент  $K_{ijij}/K_{jjjj}$ , выраженное через константы кристаллической

решётки  $S'_{ijkl}$  и ориентационные факторы текстуры  $\Delta_i$ , в следующем виде:

$$\frac{K_{ijij}}{K_{jjjj}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta_i - \Delta_k}{Q - \Delta_j} - 1 \right), \quad (5)$$

где

$$Q = (S'_{1111} - S'_{1122}) / \left( 3S'_{1111} - 3S'_{1122} - \frac{3}{2} S'_{2323} \right)$$

– характеристический параметр кристаллической решётки.

Для определения  $K_{ijij}/K_{ijij}$  воспользуемся формулами преобразования при повороте системы координат на угол  $45^\circ$  относительно оси 3 и получим:

$$\frac{K_{ijij}}{K_{jjjj}} = -\frac{2}{3} \frac{Q + \Delta_k - \Delta_i - \Delta_j}{Q - \frac{2}{3} \left[ \Delta_k - \Delta_i - \Delta_j + \frac{1}{2} \right]}. \quad (6)$$

Используя соотношения (5)-(6) и условие несжимаемости, выразим все компоненты материального тензора  $K_{ijkl}$  через одну из характерных компонент, например  $K_{1122}$ , параметры текстуры и константы кристаллической решётки:

$$\begin{aligned} K_{1111} &= -2 \frac{Q - \Delta_1}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{2222} &= -2 \frac{Q - \Delta_2}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{3333} &= -2 \frac{Q - \Delta_3}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{3311} &= \frac{Q + \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{2233} &= \frac{Q + \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{1212} &= -\frac{3}{2} \frac{Q + \frac{2}{3} \left( \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 - \frac{1}{2} \right)}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{2323} &= -\frac{3}{2} \frac{Q + \frac{2}{3} \left( \Delta_2 + \Delta_3 - \Delta_1 - \frac{1}{2} \right)}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}, \\ K_{3131} &= -\frac{3}{2} \frac{Q + \frac{2}{3} \left( \Delta_3 + \Delta_1 - \Delta_2 - \frac{1}{2} \right)}{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2} K_{1122}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для того чтобы соотношения теории были инвариантными, выразим  $K_{1122}$  через один из инвариантов материального тензора  $K_{ijkl}$ , например  $I_1$  [8]:

$$I_1 = K_{1212} + K_{2323} + K_{3131} - (K_{1122} + K_{2233} + K_{3311}) \quad (8)$$

и приравняем его соответствующему инварианту изотропной среды, в которой компоненты  $K_{ijkl}$  всегда имеют постоянные значения:  $K_{iii} = 2$ ,  $K_{ijj} = -1$  и  $K_{ijij} = 3/2$ . Отсюда  $I_1^{iso} = 15/2$ .

Весь вывод основных соотношений теории сделан в предположении существования материального тензора  $K_{ijkl}$ , что было подтверждено экспериментально путём проверки существования инварианта  $I_1$  в работе [9].

Подставляя в уравнение (8) выражения для компонентов материального тензора из (7), получим зависимости, связывающие компоненты материального тензора с текстурными параметрами и упругими постоянными кристаллической решётки:

$$\begin{aligned} K_{1111} &= 2 \frac{Q - \Delta_1}{Q - \frac{1}{5}}, K_{1122} = -\frac{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2}{Q - \frac{1}{5}}, \\ K_{2222} &= 2 \frac{Q - \Delta_2}{Q - \frac{1}{5}}, K_{2233} = -\frac{Q + \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}, \\ K_{3333} &= 2 \frac{Q - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}, K_{3311} = -\frac{Q + \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$K_{1212} = \frac{3}{2} \frac{Q - \frac{2}{3} \left( \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2 + \frac{1}{2} \right)}{Q - \frac{1}{5}},$$

$$K_{2323} = \frac{3}{2} \frac{Q - \frac{2}{3} \left( \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3 + \frac{1}{2} \right)}{Q - \frac{1}{5}},$$

$$K_{3131} = \frac{3}{2} \frac{Q - \frac{2}{3} \left( \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3 + \frac{1}{2} \right)}{Q - \frac{1}{5}}.$$

Таким образом, найдены все составляющие материального тензора  $K_{ijkl}$  в главных осях анизотропии, которые включают в себя три ориентационных фактора текстуры  $\Delta_i$  и характеристический параметр кристаллической решетки  $Q$  деформируемого материала.

Из анализа уравнений (9) следует, что в листах могут быть созданы практически любые сочетания компонентов материального тензора путём расчёта и подбора соответствующих кристаллографических ориентировок  $\{hkl\} \langle uvw \rangle$  или состава компонентов текстуры в целом для материалов с реальными параметрами  $Q$ .

Если же материал принимается изотропной (сплошной) средой, для которой  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1/5$  и  $Q = const$  [1], то все компоненты  $K_{ijkl}$  в функциональных зависимостях (9) примут постоянные значения. Другими словами: при использовании изотропной модели среды фундаментальные свойства материала не учитываются и все материалы приравниваются друг к другу.

Выражение для интенсивности напряжений, учитывающей в явном виде параметры текстуры и константы кристаллической решётки, получим, подставив зависимости (9) в функцию пластичности (2):

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ h_{12} (s_{11} - s_{22})^2 + h_{23} (s_{22} - s_{33})^2 + \right. \\ &+ h_{31} (s_{33} - s_{11})^2 + 4 \left[ \left( \frac{5}{2} - h_{12} \right) s_{12}^2 + \right. \\ &+ \left. \left. \left( \frac{5}{2} - h_{23} \right) s_{23}^2 + \left( \frac{5}{2} - h_{31} \right) s_{31}^2 \right] \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $h_{ij}$  – обобщённый показатель текстурированного состояния материала:



$$\begin{aligned} h_{12} &= \frac{Q + \Delta_3 - \Delta_1 - \Delta_2}{Q - \frac{1}{5}}, \\ h_{23} &= \frac{Q + \Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}, \\ h_{31} &= \frac{Q + \Delta_2 - \Delta_1 - \Delta_3}{Q - \frac{1}{5}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для изотропной среды при  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1/5$  получим  $h_{12} = h_{23} = h_{31} = 1$ . Тогда выражение (11) упростится:

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_{11} - s_{22})^2 + (s_{22} - s_{33})^2 + \\ &+ (s_{33} - s_{11})^2 + 6(s_{12}^2 + s_{23}^2 + s_{31}^2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

т.е. получим энергетический критерий пластичности Губера-Мизеса [10].

Уравнения связи между приращениями деформаций  $de_{ij}$  и напряжениями  $s_{ij}$  определим на основании ассоциированного закона пластического течения, согласно которому [10]:

$$de_{ij} = dI \frac{\partial s_i}{\partial s_{ij}}. \quad (13)$$

Дифференцируя уравнение (2) по (13):

$$de_{ij} = \frac{dI}{2s_i} K_{ijkl} s_{kl}, \quad (14)$$

где  $dI$  – неопределённый (пластический) множитель Лагранжа, постоянный для данных значений деформаций.

Сначала найдём неизвестную величину  $dI$ , записав выражение для работы пластической деформации  $dW$ , отнесённой к единице объёма [11]:

$$dW = s_{ij} de_{ij} = s_i de_i, \quad (15)$$

где  $de_i$  – приращение интенсивности деформаций. Подставляя выражение (14) в (15), после преобразований с учётом формулы (2) получим:

$$dI = de_i. \quad (16)$$

Окончательно, дифференцируя условие (10) согласно закону (13) и подстав-

ля равенство (16), получим следующие уравнения связи деформаций и напряжений:

$$\begin{aligned} de_{11} &= \frac{1}{2} \frac{de_i}{s_i} [h_{12}(s_{11} - s_{22}) + h_{31}(s_{11} - s_{33})], \\ de_{22} &= \frac{1}{2} \frac{de_i}{s_i} [h_{12}(s_{22} - s_{11}) + h_{23}(s_{22} - s_{33})], \\ de_{33} &= \frac{1}{2} \frac{de_i}{s_i} [h_{23}(s_{33} - s_{22}) + h_{31}(s_{33} - s_{11})], \\ de_{12} &= 2 \frac{de_i}{s_i} \left( \frac{5}{2} - h_{12} \right) s_{12}, \\ de_{23} &= 2 \frac{de_i}{s_i} \left( \frac{5}{2} - h_{23} \right) s_{23}, \\ de_{31} &= 2 \frac{de_i}{s_i} \left( \frac{5}{2} - h_{31} \right) s_{31}. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя в (17) параметры текстуры изотропного тела:  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1/5$  или  $h_{12} = h_{23} = h_{31} = 1$ , получим известные уравнения обобщённого закона Гука [10]:

$$\begin{aligned} de_{11} &= \frac{de_i}{s_i} \left[ s_{11} - \frac{1}{2}(s_{22} + s_{33}) \right], \\ de_{22} &= \frac{de_i}{s_i} \left[ s_{22} - \frac{1}{2}(s_{11} + s_{33}) \right], \\ de_{33} &= \frac{de_i}{s_i} \left[ s_{33} - \frac{1}{2}(s_{11} + s_{22}) \right], \\ de_{12} &= 3 \frac{de_i}{s_i} s_{12}, \quad de_{23} = 3 \frac{de_i}{s_i} s_{23}, \\ de_{31} &= 3 \frac{de_i}{s_i} s_{31}. \end{aligned} \quad (18)$$

При ортогональной анизотропии уравнения связи (17), как и в случае изотропной среды, могут быть записаны через разности нормальных напряжений. Для этого решим систему (17) совместно с дополнительным соотношением

$$(s_{11} - s_{22}) + (s_{22} - s_{33}) + (s_{33} - s_{11}) = 0:$$

$$\begin{aligned} s_{11} - s_{22} &= 2 \frac{s_i}{de_i} \frac{1}{x h_{12}} \left( \frac{de_{11}}{h_{31}} - \frac{de_{22}}{h_{23}} \right), \\ s_{22} - s_{33} &= 2 \frac{s_i}{de_i} \frac{1}{x h_{23}} \left( \frac{de_{22}}{h_{12}} - \frac{de_{33}}{h_{31}} \right), \end{aligned}$$

$$s_{33} - s_{11} = 2 \frac{s_i}{de_i} \frac{1}{x h_{31}} \left( \frac{de_{33}}{h_{23}} - \frac{de_{11}}{h_{12}} \right), \quad (19)$$

$$s_{12} = \frac{1}{2} \frac{s_i}{de_i} \frac{de_{12}}{\frac{5}{2} - h_{12}}, \quad s_{23} = \frac{1}{2} \frac{s_i}{de_i} \frac{de_{23}}{\frac{5}{2} - h_{23}},$$

$$s_{31} = \frac{1}{2} \frac{s_i}{de_i} \frac{de_{31}}{\frac{5}{2} - h_{31}}, \quad x = \frac{1}{h_{12}} + \frac{1}{h_{23}} + \frac{1}{h_{31}}.$$

После подстановки полученных зависимостей (19) в выражение для интенсивности напряжений (10) определим величину приращения интенсивности деформаций  $de_i$ :

$$de_i = \sqrt{2} \left\{ \frac{1}{x^2} \left[ \frac{1}{h_{12}} \left( \frac{de_{11}}{h_{31}} - \frac{de_{22}}{h_{23}} \right)^2 + \frac{1}{h_{23}} \left( \frac{de_{22}}{h_{12}} - \frac{de_{33}}{h_{31}} \right)^2 + \frac{1}{h_{31}} \left( \frac{de_{33}}{h_{23}} - \frac{de_{11}}{h_{12}} \right)^2 \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{(de_{12})^2}{\frac{5}{2} - h_{12}} + \frac{(de_{23})^2}{\frac{5}{2} - h_{23}} + \frac{(de_{31})^2}{\frac{5}{2} - h_{31}} \right] \right\}^{1/2}. \quad (20)$$

При  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1/5$  или  $h_{12} = h_{23} = h_{31} = 1$  из (20) получим классическое выражение для приращения интенсивности деформаций изотропной среды [10]:

$$de_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left( de_{11} - de_{22} \right)^2 + \left( de_{22} - de_{33} \right)^2 + \left( de_{33} - de_{11} \right)^2 + \frac{3}{2} \left[ \left( de_{12} \right)^2 + \left( de_{23} \right)^2 + \left( de_{31} \right)^2 \right]}. \quad (21)$$

При простом нагружении, когда отношение компонентов напряжений в процессе деформирования не изменяется, между приращениями деформации наблюдается линейная зависимость типа  $de_{11} = A \cdot de_{22}$ , где  $A$  – постоянная величина.

Она будет иметь место и при конечных деформациях, если компоненты  $K_{ijkl}$  сохраняют свое значение. Тогда в формулах (13)-(21) приращение деформации  $de_{ij}$  можно заменить деформациями  $e_{ij}$ , а вместо  $dI$  использовать  $I$ .

### Выводы

1. Получена запись энергетического условия пластичности ортотропного тела, учитывающая в явном виде кристаллографическую природу анизотропии свойств через ориентационные факторы текстуры и константы кристаллической решётки металлов.

2. Полученные соотношения позволяют провести анализ влияния на процесс формообразования любой кристаллографической ориентировки  $\{hkl\} \langle uvw \rangle$  и их совокупности, а также оценить степень предельного формообразования и другие параметры деформирования высокотекстурированных заготовок.

### Библиографический список

1. Гречников, Ф. В. Деформирование анизотропных материалов (резервы интенсификации) [Текст] / Ф. В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
2. Гречников, Ф. В. Проектирование технологических режимов прокатки листов и лент для вытяжки изделий с минимальным фестонообразованием [Текст] / Ф. В. Гречников, Е. В. Арышенский, Я. А. Ерисов // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – Самара, 2011. – №2(26).
3. Mises, R. Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen [Текст] / R. Mises // ZAMM. – 1928. – №8-3. – P. 161-185.
4. Смирнов, В. С. Текстурирование металлов при прокатке [Текст] / В. С. Смирнов, В. Д. Дурнев. – М.: Металлургия, 1971. – 256 с.
5. Микляев, П. Г. Деформация и разрушение металлов с учетом анизотропии их механических свойств [Текст] / П. Г. Микляев, Я. Б. Фридманн // Прочность и деформация материалов в нерав-

номерных физических полях: сб. МИФИ. – М.: Атомиздат, 1968. – №11.

6. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов [Текст] / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.

7. Адамеску, Р. А. Анизотропия физических свойств металлов [Текст] / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшин. – М.: Металлургия, 1985. – 136 с.

8. Спенсер, Э. Теория инвариантов [Текст] / Э. Спенсер. – М.: Мир, 1974. – 156 с.

9. Арышенский, Ю. М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов [Текст] / Ю. М. Арышенский. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. – 112 с.

10. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности [Текст] / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

11. Соколовский, В. В. Теория пластичности [Текст] / В. В. Соколовский. – М.: Высш. школа, 1969. – 608 с.

## DEVELOPMENT OF YIELD CRITERIA FOR THE CALCULATION OF FORMING HIGH-TEXTURED ANISOTROPIC BLANKS

© 2012 F. V. Grechnikov, Ya. A. Yerisov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

In this article we propose the yield criteria for the calculation of forming high-textured anisotropic blanks, which was developed on the basis of Mises plasticity criterion with regard to the orientation factors and lattice constants.

*Yield criteria, anisotropy, orientation factors, material tensor, associated flow rule, effective stress and strain, stress-strain equation.*

### Информация об авторах

**Гречников Федор Васильевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [gretch@ssau.ru](mailto:gretch@ssau.ru). Область научных интересов: деформирование анизотропных материалов.

**Ерисов Ярослав Александрович**, инженер кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru). Область научных интересов: исследование механизмов формирования кристаллографических ориентировок при прокатке.

**Grechnikov Fyodor Vasilievich**, corresponding member of RAS, doctor of engineering, professor, head of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [gretch@ssau.ru](mailto:gretch@ssau.ru). Area of research: anisotropic materials deforming.

**Yerisov Yaroslav Alexandrovich**, postgraduate student, engineer of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [yaroslav.erisov@mail.ru](mailto:yaroslav.erisov@mail.ru). Area of research: mechanisms of crystallographic orientation formation during sheet rolling.

УДК 621.822.5

## УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЁСТКОГО НЕСИММЕТРИЧНОГО РОТОРА В УПРУГО-ДЕМПФЕРНЫХ ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

© 2012 Ю. И. Ермилов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Рассматривается устойчивость жёсткого несимметричного ротора с упруго-демпферными подшипниками скольжения как к воздействию внутренних сил смазочного слоя, так и к действующим на ротор внешним возмущающим силам. Получены расчётные уравнения, представлены результаты расчётов и анализ устойчивости ротора без воздействия и при воздействии внешних возмущающих сил для различных видов упруго-демпферных подшипников.

*Устойчивость ротора, упруго-демпферные подшипники скольжения, возмущающие силы смазочного слоя, внешние возмущающие силы.*

### Основные обозначения:

$A_1$  – комплексная амплитуда колебаний первой цапфы ротора по оси  $x$ ;

$A_{1e}$  – комплексная амплитуда колебаний опорного элемента УДП по оси  $x$ ;

$A_2$  – комплексная амплитуда колебаний второй цапфы ротора по оси  $x$ ;

$\overline{A}_2 = A_2(A_1)^{-1}$  – приведённая амплитуда колебаний второй цапфы;

$C_1$  – коэффициент жёсткости смазочного слоя;

$C_2$  – коэффициент жёсткости крепления опорного элемента УДП;

$c_2 = C_2(C_1)^{-1}$  – приведённый коэффициент жёсткости крепления опорного элемента УДП;

$C_3$  – коэффициент упругости газовой смазки;

$c_3 = C_3(C_1)^{-1}$  – приведённый коэффициент упругости газовой смазки;

$C_{xy}$  – коэффициент поперечной жёсткости (коэффициент возбуждения) смазочного слоя, коэффициент возбуждения для возмущающей силы, приводящей к неустойчивости ротора;

$c_{xy} = C_{xy}(d_1\omega_{кр})^{-1}$  – приведённый коэффициент возбуждения смазочного слоя;

$C_{xye}$  – коэффициент возбуждения внешних сил, приводящих к неустойчивости ротора;

$c_{xye} = C_{xye}(d_1\omega_{кр})^{-1}$  – приведённый коэффициент возбуждения внешних сил;

$d_1$  – коэффициент демпфирования смазочного слоя подшипника;

$d_2$  – коэффициент демпфирования опорного элемента подшипника;

$J$  – экваториальный момент инерции ротора;

$J_p$  – полярный момент инерции ротора;

$I = \frac{J}{L^2}$  – относительный экваториальный момент инерции ротора;

$\overline{I} = \frac{J}{mL^2}$  – приведённый экваториальный момент инерции ротора;

$I_p = \frac{J_p}{L^2}$  – относительный полярный момент инерции ротора;

$\overline{I}_p = \frac{J_p}{mL^2}$  – приведённый полярный момент инерции ротора;

$\overline{I}_p \overline{\omega}$  – приведённый гироскопический момент ротора;

$L$  – расстояние между опорами;

$L_1, L_2, L_3, L_4$  – расстояния между подшипниками и центром тяжести и между колесами и подшипниками;

$L_i = \frac{L_i}{L}$  – приведённые  $L_1, L_2, L_3, L_4$ ;

$m$  – масса ротора;

$m_I$  – масса опорного элемента УДП;

$m_I = m_1 m^{-1}$  – приведённая масса опорного элемента УДП;

$x, y, z$  – система неподвижных координат с осью вращения ротора  $z$  в положении равновесия;

$x_p, y_p, z_p$  - система координат с текущим положением оси вращения ротора  $z_p$ ;

$x_1, y_1, x_2, y_2$  - координаты смещения оси первой и второй цапфы ротора относительно равновесного положения;

$x_{k1}, y_{k1}, x_{k2}, y_{k2}$  - координаты центров первого и второго колес;

$\gamma$  и  $\beta$  - соответственно углы между осями  $x$  и  $x_p$  и между  $y$  и  $y_p$ ;

$\nu$  - круговая частота прецессии;

$\bar{\nu} = \nu \omega_{кр}^{-1}$  - приведённая круговая частота прецессии;

$\eta_1 = \frac{d_1}{\sqrt{0.5C_1 m}}$  - коэффициент относительного демпфирования смазочного слоя подшипника;

$\eta_2 = \frac{d_2}{\sqrt{0.5C_1 m}}$  - коэффициент относительного демпфирования опорного элемента подшипника;

$\omega$  - частота вращения ротора;

$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{2C_1}{m}}$  - собственная цилиндрическая частота колебаний симметричного ротора в жёстко закреплённых подшипниках;

$\bar{\omega} = \omega \omega_{кр}^{-1}$  - приведённая частота вращения ротора.

## Введение

Упруго-демпферные подшипники скольжения (УДП) широко применяются в качестве опор высокооборотных турбомашин. Причиной этого является способность таких опор подавлять самовозбуждающиеся колебания ротора, возникающие при его вращении вследствие возмущающей силы, действующей в смазочном слое при вращении ротора и направленной перпендикулярно вектору смещения цапфы из равновесного положения.

К наиболее известным из УДП с жидкостной смазкой можно отнести подшипники с плавающей втулкой (рис. 1, а) и различные подшипники скольжения с жидкостной смазкой, в которых корпус подшипника закреплён в специальных демпферах различных конструкций. Из подшипников с газовой смазкой наиболее

известны лепестковые газодинамические подшипники (рис. 1, б).

УДП с жидкостной смазкой широко используются в турбокомпрессорных агрегатах наддува двигателей внутреннего сгорания (подшипники с плавающей втулкой). Лепестковые газодинамические подшипники используются в турбохолодильниках систем кондиционирования самолётов, в малых энергетических установках и являются перспективными для использования во вспомогательных силовых установках, малых центробежных компрессорах, малых турбореактивных двигателях и других высокооборотных турбомашин. Газовый смазочный слой имеет существенно меньшее демпфирование по сравнению с жидкостным слоем, поэтому роторы практически всех турбомашин с газовой смазкой являются жёсткими.

Степень устойчивости роторов с УДП зависит от правильного выбора параметров этих подшипников и ротора. В работах [1, 2, 3] получены уравнения для определения устойчивости жёсткого несимметричного ротора в обычных подшипниках скольжения с жидкостной и газовой смазкой как к силам смазочного слоя, так и к возмущающим внешним гидромеханическим силам в проточных частях колёс и уплотнениях. Результаты расчётов устойчивости ротора в этих условиях в перечисленных и других известных работах не представлены.

В данной работе рассматривается устойчивость жёсткого ротора в обычных подшипниках скольжения с жидкостной смазкой и в УДП с жидкостной и газовой смазкой к силам смазочного слоя и к внешним гидромеханическим силам в проточных частях колёс. Коэффициенты жёсткости и демпфирования задаются в виде коэффициентов, которые в общем случае могут зависеть от частоты вращения и величины смещения цапфы и вычисляются отдельно. Это позволяет проводить расчёты устойчивости роторных систем с различными УДП скольжения.

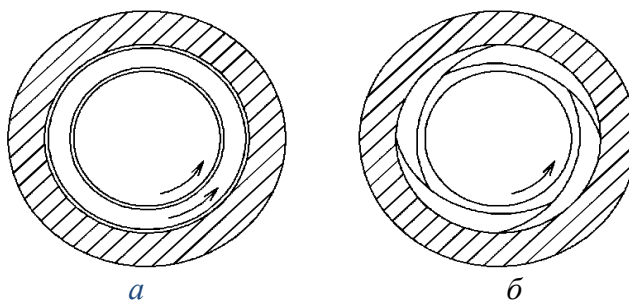


Рис. 1. Упруго-демпферные подшипники скольжения:  
 а - подшипник с плавающей втулкой; б - лепестковый газодинамический подшипник

Данная работа является продолжением работы [4], где рассматривается устойчивость жёсткого симметричного ротора.

Представлены проведённые в широком диапазоне параметров роторной системы с обычными подшипниками результаты расчётов устойчивости, частоты возникающих колебаний, относительной амплитуды и фазы колебаний цапф.

Получены уравнения для расчёта устойчивости несимметричного ротора в УДП с жидкостной и газовой смазкой без и с учётом гидромеханических сил в рабочих колесах. Представлены результаты расчётов устойчивости роторной системы с УДП, проведённые в широком диапазоне параметров.

### Вывод расчётных уравнений

УДП представляют собой подшипники с упруго-демпферным креплением опорного элемента (элементов), образующего противоположную поверхности цапфы поверхность скольжения. Для подшипника с плавающей втулкой (рис. 1, а) опорным элементом является плавающая втулка, для лепесткового газодинамического подшипника (рис. 1, б) опорными элементами являются упругие лепестки, расположенные между корпусом подшипника и цапфой.

Схема ротора в УДП с жидкостной смазкой показана на рис. 2, а ( $m_I=0$ ). На рис. 2, б показана динамическая схема обычного подшипника скольжения с жидкостной смазкой. На рис. 2, в показана динамическая схема УДП с газовой смазкой.

Рассматривается задача устойчивости ротора к поперечным самовозбуж-

дающимся колебаниям (координата центра масс ротора  $z_C=\text{const}$ ) под действием возмущающих сил смазочного слоя и внешних гидромеханических сил, генерируемых в проточных частях рабочих колёс турбомашин.

Приняты следующие допущения. Ротор идеально отбалансирован, поэтому геометрическая ось вращения ротора  $z_p$  совпадает с главной осью инерции. Угол между осью  $z_p$  и осью вращения  $z$  в положении равновесия является малым, и разницей между главными моментами инерции ротора  $I = I_x = I_y$ ,  $I_z = I_z$  относительно осей  $x_p$ ,  $y_p$  и  $z_p$  и моментов инерции относительно осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  пренебрегаем. Ротор является лёгким, поэтому принимаем равными коэффициенты жёсткости и демпфирования вдоль осей  $x$  и  $y$ .

С учётом принятых допущений, применяя теорему о движении центра масс и теорему об изменении кинетического момента механической системы в относительном движении по отношению к центру масс, запишем дифференциальные уравнения движения ротора в неподвижной системе координат  $xuz$  [1, 2]:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_C &= R_{x1} + R_{x2} + R_{kx1} + R_{kx2}; \\ m\ddot{y}_C &= R_{y1} + R_{y2} + R_{ky1} + R_{ky2}; \\ I_z\omega\dot{\beta} - I_x\ddot{\beta} &= R_{y1}L_1 - R_{y2}L_2 + R_{ky1}(L_1 + L_3) \\ &+ R_{ky2}(L_2 + L_4); \\ I_z\omega\dot{\psi} + I_y\dot{\beta} &= -R_{x1}l_1 + R_{x2}l_2 + R_{kx1}(l_1 + l_3) \\ &+ R_{kx2}(L_2 + L_4), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$ ,  $R_{y1}$  и  $R_{y2}$  – проекции реакций соответственно 1-го и 2-го подшипников;  $R_{kx1}$ ,  $R_{ky1}$ ,  $R_{kx2}$  и  $R_{ky2}$  – проекции гидромеханических сил 1-го и 2-го рабочих колёс.

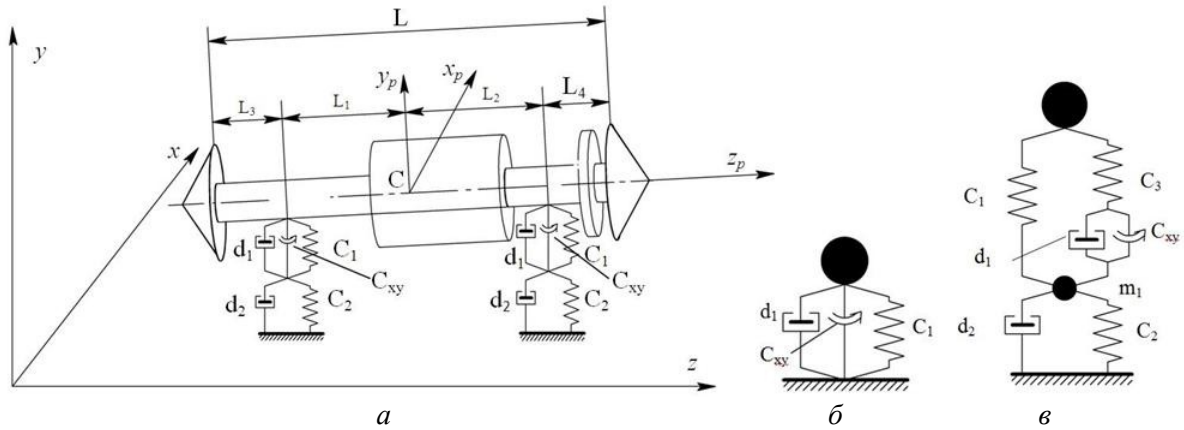


Рис. 2. Динамическая схема ротора (а) и динамические схемы обычного подшипника скольжения (б) и УДП с газовой смазкой (в). \$C\_1\$ и \$C\_3, d\_1, C\_{xy}\$ - коэффициенты жёсткости, демпфирования и возбуждения смазочного слоя; \$C\_2, d\_2\$ - коэффициенты жёсткости и демпфирования опорных элементов; \$m\$ - масса ротора, \$m\_1\$ - масса опорного элемента подшипника

Рассмотрим сначала устойчивость ротора с обычными подшипниками скольжения (рис. 2, б). В этом случае имеем:

$$R_x = -C_1 x - C_{xy} y - d_1 \dot{x};$$

$$R_y = C_{xy} x - C_1 y - d_1 \dot{y}. \quad (2)$$

Гидромеханические силы рабочих колёс действуют в тангенциальном направлении [1, 3], при малом эксцентриситете имеют линейный характер и могут быть выражены через рассчитываемый отдельно коэффициент возбуждения внешних сил \$C\_{xye}\$ следующим образом:

$$R_{kx} = -C_{xye} y_k;$$

$$R_{ky} = C_{xye} x_k. \quad (3)$$

Здесь и далее принимаем, что коэффициент \$C\_{xye}\$ одинаков для обоих колёс.

Выразив в системе (1) координаты центра тяжести и колёс и углы \$\beta\$ и \$\gamma\$ через координаты центров первой и второй цапф \$x\_1, y\_1, x\_2, y\_2\$ зависимостями:

$$x_c = x_1 \bar{L}_2 + x_2 \bar{L}_1; \quad y_c = y_1 \bar{L}_2 + y_2 \bar{L}_1;$$

$$\beta = \frac{x_2 - x_1}{L}; \quad \gamma = \frac{y_2 - y_1}{L},$$

$$x_{k1} = (1 + \bar{L}_3)x_1 - \bar{L}_3 x_2; \quad x_{k2} = (1 + \bar{L}_4)x_2 - \bar{L}_4 x_1;$$

$$y_{k1} = (1 + \bar{L}_3)y_1 - \bar{L}_3 y_2; \quad y_{k2} = (1 + \bar{L}_4)y_2 - \bar{L}_4 y_1 \quad (4)$$

и сделав экспоненциальную подстановку \$x\_1^\* = A\_1 e^{\lambda t}, y\_1^\* = B\_1 e^{\lambda t}, x\_2^\* = A\_2 e^{\lambda t}\$ и \$y\_2^\* = B\_2 e^{\lambda t}\$,

\$A\_1, B\_1, A\_2, B\_2\$ - комплексные амплитуды, \$x\_1^\*, y\_1^\*, x\_2^\*, y\_2^\*\$ - комплексные величины с действительными частями, равными ко-

ординатам \$x\_1, y\_1, x\_2, y\_2\$, соответственно, \$\lambda\$ - комплексная частота прецессии цапфы, получим систему уравнений с неизвестными амплитудами \$A\_1, A\_2, B\_1, B\_2\$:

$$(m\bar{L}_2 \lambda^2 + d_1 \lambda + C_1) A_1 + (m\bar{L}_1 \lambda^2 + d_1 \lambda + C_1) A_2 + C_{s1} B_1 + C_{s2} B_2 = 0;$$

$$-C_{s1} A_1 - C_{s2} A_2 + (m\bar{L}_2 \lambda^2 + d_1 \lambda + C_1) B_1 + (m\bar{L}_1 \lambda^2 + d_1 \lambda + C_1) B_2 = 0;$$

$$(-J_p \omega \lambda - C_{s3}) A_1 + (J_p \omega \lambda + C_{s4}) A_2 + (J \lambda^2 + \bar{L}_1 d_1 \lambda + \bar{L}_1 C_1) B_1 + (-J \lambda^2 - \bar{L}_2 d_1 \lambda - \bar{L}_2 C_1) B_2 = 0;$$

$$(-J \lambda^2 - \bar{L}_1 d_1 \lambda - \bar{L}_1 C_1) A_1 + (J \lambda^2 + \bar{L}_2 d_1 \lambda + \bar{L}_2 C_1) A_2 + (-J_p \omega \lambda - C_{s3}) B_1 + (J_p \omega \lambda + C_{s4}) B_2 = 0, \quad (6)$$

где

$$C_{s1} = C_{xy} + C_{xye} (1 + \bar{L}_3) - C_{xye} \bar{L}_4;$$

$$C_{s2} = C_{xy} - C_{xye} \bar{L}_3 + C_{xye} (1 + \bar{L}_4);$$

$$C_{s3} = C_{xy} \bar{L}_1 + C_{xye} (\bar{L}_1 + \bar{L}_3) (1 + \bar{L}_3) + C_{xye} \bar{L}_4 (\bar{L}_2 + \bar{L}_4);$$

$$C_{s4} = C_{xy} \bar{L}_2 + C_{xye} \bar{L}_3 (\bar{L}_1 + \bar{L}_3) + C_{xye} (\bar{L}_2 + \bar{L}_4) (1 + \bar{L}_4) \quad (7)$$

Неизвестные \$A\_1, B\_1, A\_2\$ и \$B\_2\$ имеют ненулевые значения, когда определитель системы (6) равен нулю. Отсюда получаем характеристическое уравнение восьмой степени относительно неизвестной комплексной частоты \$\lambda\$.

Фактором, который может привести к неустойчивости движения ротора в подшипнике, являются возмущающие силы,

характеризуемые коэффициентами  $C_{xy}$  и  $C_{xue}$ . Начиная с некоторой величины  $C_{xy}$  и  $C_{xue}$ , ротор теряет устойчивость, т. е. амплитуда прецессии центра цапфы начинает неуклонно возрастать. Задача определения предела устойчивости роторной системы к внешним возмущающим силам заключается в определении предельного (максимального) значения  $C_{xue}$ , при котором сохраняется устойчивость при заданном значении  $C_{xy}$ . При этом значении  $C_{xue}$  траектория центра цапфы будет представлять постоянную орбиту, действительная часть комплексной частоты  $\lambda$  будет равна нулю, а мнимая часть – частоте круговой прецессии  $\nu$ .

Для сокращения порядка степени уравнений относительно неизвестной  $\lambda$  и сокращения времени вычислений  $\nu$  и  $C_{xue}$  целесообразно использовать свойство изотропности характеристик подшипника в радиальном направлении [5]. Из этого свойства следует, что при потере устойчивости ротора движение его центра происходит по окружности и амплитуды  $A_1$  и  $B_1$ ,  $A_2$  и  $B_2$  связаны следующими соотношениями:

$$B_1 = -iA_1; B_2 = -iA_2, \quad (8)$$

где  $i$  – мнимая единица.

Подставив выражения (8) в первое и четвертое уравнение системы (6), получим систему с неизвестными  $A_1$  и  $A_2$ :

$$\begin{aligned} & (m\bar{L}_2\lambda^2 + d_1\lambda + C_1 - iC_{s1})A_1 \\ & + (m\bar{L}_1\lambda^2 + d_1\lambda + C_1 - iC_{s2})A_2 = 0; \\ & - (J\lambda^2 + \bar{L}_1d_1\lambda + \bar{L}_1C_1 - J_p\omega\lambda - C_{s3})A_1 + \\ & (J\lambda^2 + \bar{L}_2d_1\lambda + \bar{L}_2C_1 - J_p\omega\lambda - C_{s4})A_2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Приравнявая к нулю определитель этой системы, получим комплексное характеристическое уравнение четвертой степени относительно частоты  $\lambda$ . Решение этого уравнения и нахождение минимального значения  $C_{xue}$ , при котором возникает потеря устойчивости ( $\lambda=iv$ ), производится при помощи программного пакета Maple.

Для определения устойчивости роторной системы без внешних сил ( $C_{xue}=0$ ), т. е. значения  $C_{xy}$  при потере устойчивости, характеристическое уравнение, полу-

ченное из системы (9), вычисляется при  $C_{xue} = 0$ , и далее определяется минимальное  $C_{xy}$ , при котором  $\lambda=iv$ .

Рассмотрим далее устойчивость ротора с УДП. Представим систему (9) в виде

$$\begin{aligned} & (m\bar{L}_2\lambda^2 + c_{\pi} - iC_{k1})A_1 + (m\bar{L}_1\lambda^2 + c_{\pi} - iC_{k2})A_2 = 0 \\ & - (J\lambda^2 + \bar{L}_1c_{\pi} - J_p\omega\lambda - iC_{k3})A_1 + \\ & (J\lambda^2 + \bar{L}_2c_{\pi} - J_p\omega\lambda - iC_{k4})A_2 = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где согласно (7)

$$\begin{aligned} c_{k1} &= C_{xye}(1 + \bar{L}_3) - C_{xye}\bar{L}_4; \\ c_{k2} &= -C_{xye}\bar{L}_3 + C_{xye}(1 + \bar{L}_4); \\ c_{k3} &= C_{xye}(\bar{L}_1 + \bar{L}_3)(1 + \bar{L}_2) + C_{xye}\bar{L}_4(\bar{L}_2 + \bar{L}_4); \\ c_{k4} &= C_{xye}\bar{L}_3(\bar{L}_1 + \bar{L}_3) + C_{xye}(\bar{L}_2 + \bar{L}_4)(1 + \bar{L}_4), \end{aligned} \quad (11)$$

а  $c_{\pi} = (d_1\lambda + C_1 - iC_{xy})$  – комплексная жёсткость обычного подшипника скольжения с жидкостной смазкой.

Комплексная жёсткость УДП с жидкостной смазкой (динамическая схема подшипника с массой опорного элемента подшипника  $m_1=0$  показана на рис. 2, а) и УДП с газовой смазкой (рис. 2, в) представляется как жёсткость последовательно и параллельно соединённых элементов жёсткости, демпфирования и возбуждения.

Для УДП с жидкостной смазкой и массой опорного элемента подшипника  $m_1=0$  комплексная жёсткость имеет вид

$$C_{ж} = \frac{K_1K_2}{K_1 + K_2}, \quad (12)$$

где  $K_1 = d_1\lambda + C_1 - iC_{xy}$ ,  $K_2 = d_2\lambda + C_2$ .

Заменяв в системе (10)  $c_{\pi}$  на  $C_{ж}$ , получим систему комплексных уравнений для определения устойчивости ротора в УДП с жидкостной смазкой:

$$\begin{aligned} & (m\bar{L}_2\lambda^2 + C_{ж} - iC_{k1})A_1 + (m\bar{L}_1\lambda^2 + C_{ж} - iC_{k2})A_2 = 0; \\ & - (J\lambda^2 + \bar{L}_1C_{ж} - J_p\omega\lambda - iC_{k3})A_1 + \\ & + (J\lambda^2 + \bar{L}_2C_{ж} - J_p\omega\lambda - iC_{k4})A_2 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Приравнявая к нулю определитель системы (13), получим комплексное характеристическое уравнение шестой степени относительно частоты  $\lambda$ . Решение этого уравнения и нахождение минимального значения  $C_{xue}$ , при котором возникает потеря устойчивости ( $\lambda=iv$ ), производится



аналогично решению характеристического уравнения для системы (9).

Система комплексных уравнений для определения устойчивости ротора в УДП с газовой смазкой (рис. 2, в) имеет аналогичный системе (13) вид

$$\begin{aligned} & (m\bar{L}_2\lambda^2 + C_r - iC_{k1})A_1 + (m\bar{L}_1\lambda^2 + C_r - iC_{k2})A_2 = 0; \\ & - (J\lambda^2 + \bar{L}_1C_r - J_p\omega\lambda - iC_{k3})A_1 \\ & + (J\lambda^2 + \bar{L}_2C_r - J_p\omega\lambda - iC_{k4})A_2 = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $C_r$  – комплексная жёсткость УДП с газовой смазкой, определяемая из выражения

$$C_r = \frac{K_3(K_2 + m_1\lambda^2)}{K_3 + K_2 + m_1\lambda^2} \quad (15)$$

которое может быть получено из уравнения движения опорного элемента подшипника массой  $m_1$ :

$$m_1\lambda^2 A_{1e} + K_2 A_{1e} + K_3(A_1 - A_{1e}) = 0, \quad (16)$$

где  $A_{1e}$  – амплитуда колебаний опорного элемента, а  $K_3$  – комплексная жёсткость газового слоя, определяемая из выражения

$$K_3 = C_1 + \frac{C_2(d_1\lambda - iC_{xy})}{C_3 + d_1\lambda - iC_{xy}}. \quad (17)$$

Приравнявая к нулю определитель системы (14), получим комплексное характеристическое уравнение десятой степени относительно частоты  $\lambda$ . Решение этого уравнения и нахождение минимального значения  $C_{xye}$ , при котором возникает

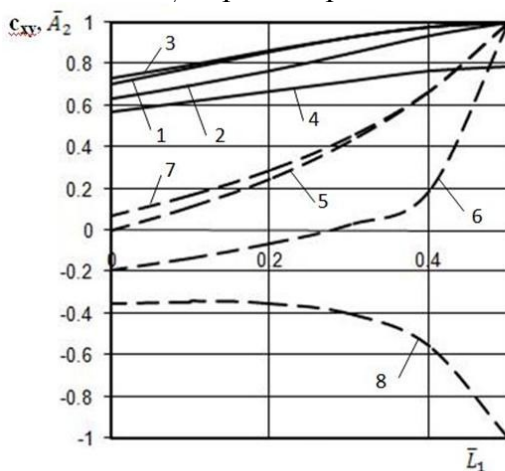


Рис. 3. Зависимость параметра устойчивости  $C_{xy}$  (сплошные кривые 1...4) и амплитуды  $\bar{A}_2$  (пунктир 5...8) от параметра  $\bar{L}_1$ . Пары кривых 1 и 5, 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8 соответствуют сочетаниям  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p\bar{\omega}$  0 и 0; 0,2 и 0; 0,2 и 0,2 и 0,4 и 0

потеря устойчивости ( $\lambda=iv$ ), производится аналогично решению характеристического уравнения для системы (9).

Для сокращения количества независимых параметров роторной системы с обычными подшипниками скольжения разделим систему (9) на  $C_1$  и после преобразований получим, что устойчивость этой системы полностью определяется параметрами  $\bar{L}_1$ ,  $\eta_1$ ,  $C_{xy}$ ,  $\bar{J}$ ,  $\bar{J}_p\bar{\omega}$ ,  $C_{xye}$ ,  $\bar{L}_3$  и  $\bar{L}_4$ . Для описания поведения роторной системы с жидкостными УДП (система 13) необходимо добавить параметры  $c_2$  и  $\eta_2$ , а системы с газовыми УДП (система 14) – параметры  $m_1$ ,  $c_2$ ,  $\eta_2$  и  $c_3$ .

### Результаты расчётов

На рис. 3 и 4 представлены характеристики роторной системы с обычными подшипниками скольжения на границе устойчивости без учёта сил рабочих колес.

На рис. 3 представлены зависимости параметров  $C_{xy}$  и  $\bar{A}_2$  от  $\bar{L}_1$  при различных значениях параметров  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p\bar{\omega}$ . Параметр  $\eta_1$  не влияет на величину  $C_{xy}$ , поскольку силы возбуждения и демпфирования для каждого подшипника находятся в одной плоскости.

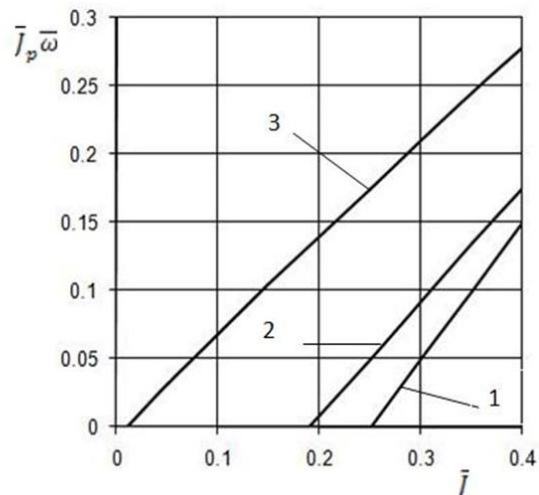


Рис. 4. Зависимость границы перехода от синфазной прецессии цапф (область над кривой) к противофазной при различных значениях  $\bar{L}_1$ . 1 -  $\bar{L}_1=0,5$ ; 2 -  $\bar{L}_1=0,25$ ; 3 -  $\bar{L}_1=0$

Значение  $c_{xy}=1$  соответствует симметричному ротору с точечной массой. Положительное значение параметра  $\bar{L}_2$  соответствует синфазным, отрицательное – противофазным колебаниям цапф.

Как видно из графиков, снижение величины  $c_{xy}$  происходит при уменьшении  $\bar{L}_1$  и увеличении  $\bar{J}$ . Противофазные колебания наблюдаются при любых значениях  $\bar{L}_1$  для  $\bar{J} = 0,4, \bar{J}_p \bar{\omega} = 0$  (кривая 8) и при  $\bar{L}_1 < 0,3$  для  $\bar{J} = 0,2, \bar{J}_p \bar{\omega} = 0$  (кривая 6).

При равных  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  значения  $c_{xy}$  отличаются слабо (кривые 1 и 3) и колебания являются синфазными (кривые 5 и 7). При разных  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  колебания противофазные (кривые 6 и 8).

На рис. 4. показаны зависимости границ перехода от синфазных колебаний (область над кривой) к противофазным от  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  при различных значениях  $\bar{L}_1$ .

На рис. 5, 6 и 7 представлены результаты расчётов характеристик роторной системы на границе устойчивости с обычными подшипниками скольжения при учёте возмущающих сил рабочих колёс.

Колёса располагаются на одинаковых расстояниях от подшипников так, что  $\bar{L}_3 = \bar{L}_4$ . Направление каждой возмущаю-

щей силы выражается коэффициентом  $\alpha_1$  (колесо возле опоры 1) и  $\alpha_2$  (колесо возле опоры 2). При  $\alpha=1$  сила направлена по вращению, при  $\alpha=-1$  – против вращения, при  $\alpha=0$  сила равна нулю. При равенстве модулей  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  модули сил и, следовательно, коэффициенты  $c_{xye1} = c_{xye2} = c_{xye}$ . Для всех вариантов за исключением специально оговорённых  $\bar{L}_1=0,5; \bar{J}=0,3; c_{xy}=0,25, \eta_1=0,25$ .

На рис. 5 показаны зависимости предельного значения  $c_{xye}$  на границе устойчивости от  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  для различных сочетаний  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Для кривых 1, 2, 3, 7, с противоположными или неотрицательными  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  величина  $c_{xye}$  возрастает с ростом  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ , а при отрицательных или равных нулю  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (кривые 4, 5 и 6) – наоборот, уменьшается, что связано с пониженной частотой прецессии из-за гироскопического эффекта. Снижение  $\bar{L}_3$  и  $\bar{L}_4$  (приближение рабочих колёс к подшипникам), как и следовало ожидать, вызывает увеличение  $c_{xye}$  (кривые 4 и 6). Увеличение  $\eta_1$  с 0,25 до 1, наоборот, приводит к снижению  $c_{xye}$  (кривые 1 и 7).

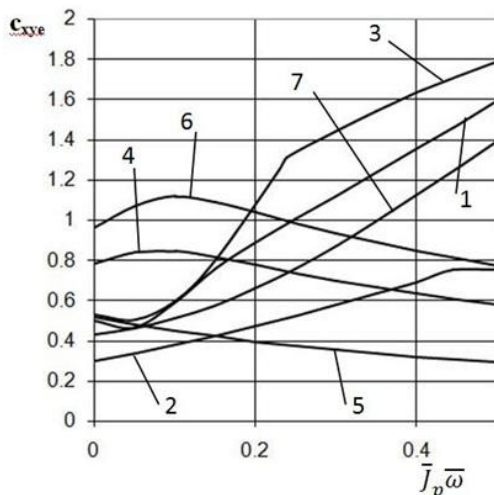


Рис. 5. Зависимость параметра  $c_{xye}$  на границе устойчивости от параметра  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ . Для кривых 1...5 -  $\bar{L}_3 = \bar{L}_4 = 0,25$ , кривая 1-  $\alpha_1=1, \alpha_2=0$ ; 2-  $\alpha_1=1, \alpha_2=1$ ; 3-  $\alpha_1=1, \alpha_2=-1$ ; 4-  $\alpha_1=-1, \alpha_2=0$ ; 5-  $\alpha_1=-1, \alpha_2=-1$ ; кривая 6-  $\alpha_1=-1, \alpha_2=0$ ;  $\bar{L}_3 = \bar{L}_4 = 0,15$ ; кривая 7-  $\alpha_1=1, \alpha_2=0$ ;  $\eta_1=1$

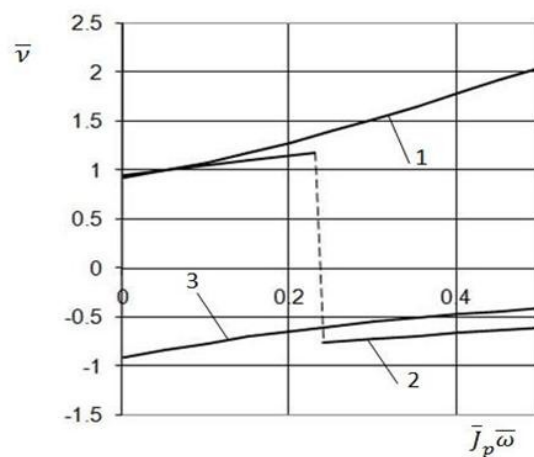


Рис. 6. Зависимость приведённой частоты прецессии  $\bar{\nu}$  на границе устойчивости от параметра  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ . Кривые 1-  $\alpha_1=1, \alpha_2=0$ ; 2-  $\alpha_1=1, \alpha_2=-1$ ; 3-  $\alpha_1=-1, \alpha_2=-1$

На рис. 6 представлены зависимости частоты  $\bar{\nu}$  от  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ . При противоположно направленных внешних силах (кривая 2,  $\alpha_1=1, \alpha_2=-1$ ) прецессия скачкообразно изменяется с прямой на обратную, однако частичная компенсация разнонаправленных внешних сил обуславливает продолжение роста устойчивости с увеличением  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  (кривая 3, рис. 5), хотя скорость роста снижается.

На рис. 7 показаны зависимости составляющих амплитуды  $\bar{A}_2$ :  $\bar{A}_{2x}$  (кривые 1 и 2) и  $\bar{A}_{2y}$  (пунктир 3 и 4) от  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ .

На рис. 8 и 9 представлены результаты расчётов параметра  $c_{xy}$  на границе устойчивости для роторной системы с УДП с жидкостной и газовой смазкой без учёта сил рабочих колёс в зависимости от параметра  $c_2$ . На рис. 8 и далее расчёты представлены для диапазона  $c_2$  от 0,05 до 100. Для удобства анализа в правой половине диаграммы, при  $c_2 > 1$  по оси абсцисс откладывается обратная величина  $c_2^{-1}$ , таким образом, участок оси  $1 > c_2^{-1} > 0$  соответствует диапазону  $1 < c_2 < \infty$ . На рис. 8 и 9 вертикальные оси имеют структуру, ана-

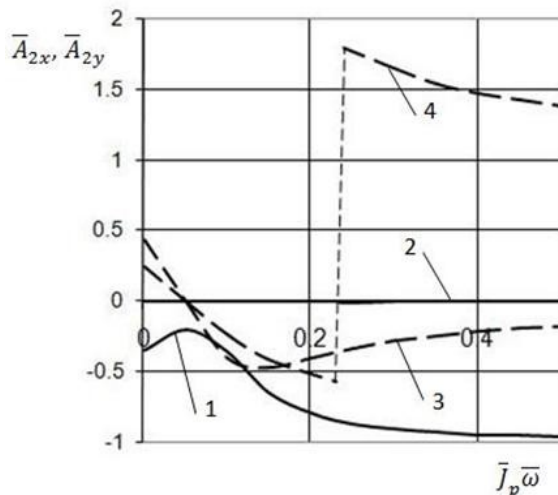


Рис. 7. Зависимость составляющих  $\bar{A}_{2x}$  (сплошные кривые 1 и 2) и  $\bar{A}_{2y}$  (пунктир 3 и 4) на границе устойчивости от параметра  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ .  $\bar{J}=0,3; \eta_1=0,25; \bar{L}_1=0,5; \bar{L}_2=\bar{L}_4=0,25$ . Кривые 1 и 3-  $\alpha_1=1, \alpha_2=0$ ; 2 и 4-  $\alpha_1=1, \alpha_2=-1$

логичную оси абсцисс, и верхняя половина оси ординат ( $0 < 25c_{xy}^{-1} < 5$ ) соответствует области  $5 < c_{xy} < \infty$ .

На рис. 8 представлены зависимости  $c_{xy}$  для ротора в УДП с жидкостной смазкой при различных значениях  $\bar{L}_1, \bar{J}_p \bar{\omega}$  и  $\eta_1$ . Видно, что вариант с  $\bar{L}_1=0,5$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}=0$  (кривая 1) даёт наиболее широкий диапазон  $c_2$  с  $c_{xy} \rightarrow \infty$  и совпадает с устойчивостью симметричного ротора с точечной массой ( $\bar{J}=0, \bar{J}_p \bar{\omega}=0$ ). Увеличение  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  до 0,2 (кривая 2) приводит к сужению диапазона  $c_2$  с  $c_{xy} \rightarrow \infty$ . Увеличение  $\eta_1$  с 0,25 до 1 (кривая 3) не сужает этот диапазон, однако приводит к снижению  $c_{xy}$  справа от него. Изменение  $\bar{L}_1$  с 0,5 до 0,25 при  $\bar{J}_p \bar{\omega}=0$  (кривые 1 и 4) приводит к существенному сужению диапазона  $c_2$  с  $c_{xy} \rightarrow \infty$ . Снижение  $\bar{L}_1$  при  $\bar{J}_p \bar{\omega}=0,2$  (кривые 2 и 5) приводит к резкому снижению  $c_{xy}$  во всей области  $c_2 \leq 1,25$ . Наконец, снижение  $\bar{L}_1$  при  $\eta_1=1$  (кривые 3 и 6) приводит к резкому снижению  $c_{xy}$  в области  $c_2 \leq 3$ .

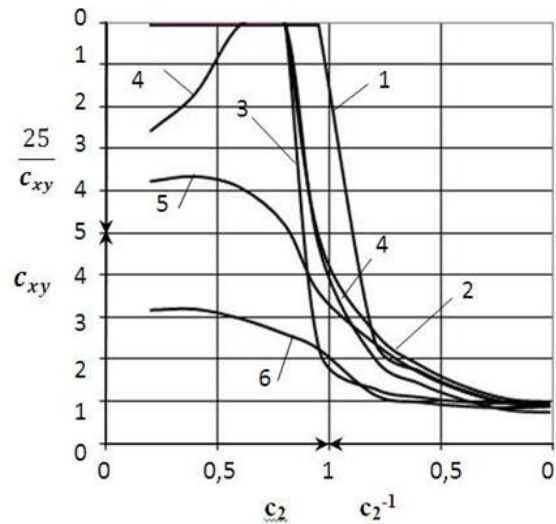


Рис. 8. Зависимость параметра  $c_{xy}$  от параметра  $c_2$  сил на границе устойчивости для ротора в УДП с жидкостной смазкой без внешних  $m_1=0; \bar{J}=0,3; \eta_2=1$ . 1 -  $\bar{L}_1=0,5, \bar{J}_p \bar{\omega}=0,0, \eta_1=0,25$ ; 2 -  $\bar{L}_1=0,5, \bar{J}_p \bar{\omega}=0,2, \eta_1=0,25$ ; 3 -  $\bar{L}_1=0,5, \bar{J}_p \bar{\omega}=0,2, \eta_1=1$ ; 4 -  $\bar{L}_1=0,25, \bar{J}_p \bar{\omega}=0, \eta_1=0,25$ ; 5 -  $\bar{L}_1=0,25, \bar{J}_p \bar{\omega}=0,2, \eta_1=0,25$ ; 6 -  $\bar{L}_1=0,25, \bar{J}_p \bar{\omega}=0,2, \eta_1=1$

На рис. 9 представлены зависимости для симметричного ротора ( $\bar{L}_1=0,5$ ) в УДП с жидкостной (кривые 1...5) и газовой (кривые 6, 7) смазкой при различных значениях  $\eta_2$ ,  $m_1$  и  $c_3$ . Как видно из кривых 1 и 2, снижение  $\eta_2$  с 1 до 0,5 не изменяет области  $c_{xy} \rightarrow \infty$ . Увеличение  $\eta_2$  до 2 (кривая 3) приводит к резкому снижению  $c_{xy}$  в области  $c_2 \leq 1,2$  и исчезновению области  $c_{xy} \rightarrow \infty$ . Увеличение  $m_1$  с 0 до 0,01 (кривые 1 и 4) приводит к исчезновению области  $c_{xy} \rightarrow \infty$ . Фактор сжимаемости газовой смазки ( $c_3=10$ ,  $m_1=0,01$ , кривая 6) приводит по сравнению с несжимаемой смазкой (кривая 4) к повышению  $c_{xy}$ , возникновению области  $c_{xy} \rightarrow \infty$ , причем эта область оказывается даже шире, чем при жидкостной смазке и  $m_1=0$  (кривая 1). Дальнейшее увеличение сжимаемости ( $c_3=2$ , кривая 7) приводит к ещё большему расширению области  $c_{xy} \rightarrow \infty$ .

На рис. 10 и 11 представлены результаты расчётов параметра  $c_{xye}$  на границе устойчивости роторной системы с УДП с жидкостной (рис. 10) и газовой (рис. 11) смазкой с учётом возмущающих сил рабочих колёс в зависимости от параметра  $c_2$ .

На рис. 10 представлены зависимости  $c_{xye}$  для различных вариантов действия внешних сил ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и параметров  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  и  $\bar{L}_1$ . Изменение  $c_{xye}$  при увеличении  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  с 0,1 до 0,3 и разных сочетаниях  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  иллюстрируется парами кривых 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6. Видно, что увеличение  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  приводит к росту  $c_{xye}$  для положительных или смешанных значений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (кривые 1...4). При отрицательных и нулевых  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  наблюдается, наоборот, уменьшение  $c_{xye}$  (кривые 5 и 6). Увеличение  $\eta_1$  с 0,25 до 1 (кривые 1 и 9) приводит к существенному снижению  $c_{xye}$ .

Уменьшение  $\bar{L}_1$  с 0,5 до 0,25 (кривые 1 и 8) приводит к снижению  $c_{xye}$ .

На рис. 11 представлены зависимости  $c_{xye}$  для различных вариантов действия внешних сил ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и параметров  $m_1$ ,  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}$ . Влияние различных сочетаний  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  представлено кривыми 1, 2 и 3, соответствующими кривым 1, 3 и 5 на рис. 10 для жидкостной смазки. По сравнению с базовым вариантом (кривая 1) изменение отдельных параметров приводит к следующим результатам. Сравнение этих кривых для жидкостной и газовой смазки показывает, что параметр  $c_3$ , характеризующий сжимаемость смазки, при  $\bar{J}_p \bar{\omega} = 0,1$  практически не влияет на  $c_{xye}$  при  $c_3=10$ . Это справедливо также для  $c_3=2$  (результаты здесь не приводятся). Сравнение кривой 6 (рис. 11) и 2 (рис.10) для  $\bar{J}_p \bar{\omega} = 0,3$ , отличающихся наличием сжимаемости ( $c_3=10$  для кривой 6), также показывает, что эти кривые практически совпадают. Проведённое сравнение показывает, что для расчётов устойчивости (параметра  $c_{xye}$ ) для газовой смазки вполне можно использовать уравнения для жидкостной смазки при  $m_1=0$ , что значительно упрощает решение задачи устойчивости роторной системы.

Влияние  $m_1$ ,  $\bar{J}$  и  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  на  $c_{xye}$  по сравнению с базовым вариантом (кривая 1) представлено на рис. 11 кривыми 4 и 5 и 6 соответственно. Видно, что даже большая величина  $m_1=0,1$  (для лепестковых газодинамических подшипников  $m_1 < 0,01$ ) очень слабо влияет на  $c_{xye}$ . Снижение  $\bar{J}$  с 0,3 до 0,1 резко повышает  $c_{xye}$ . Увеличение  $\bar{J}_p \bar{\omega}$  также повышает  $c_{xye}$ .

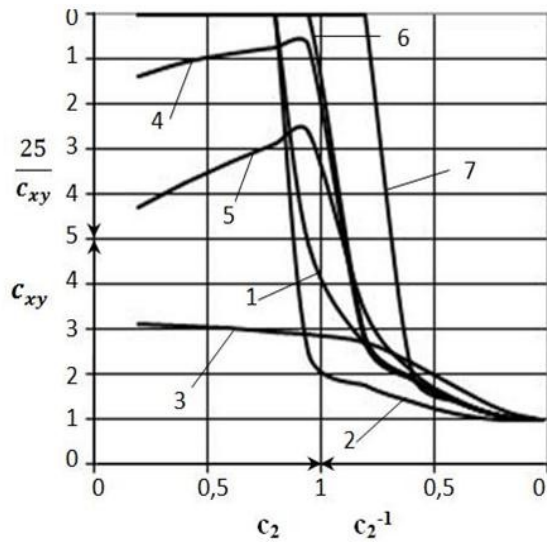


Рис. 9. Зависимость параметра  $c_{xy}$  на границе устойчивости от параметра  $c_2$  для ротора в УДП без внешних сил на границе устойчивости. Кривые 1...5 – жидкостная смазка, 6, 7 – газовая смазка.  $\bar{f}=0,3$ ,  $\eta_1=0,25$ ,  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,2$ ;  $\bar{L}_1=0,5$ . 1 -  $m_1=0$ ,  $\eta_2=1$ ; 2 -  $m_1=0$ ,  $\eta_2=0,5$ ; 3 -  $m_1=0$ ,  $\eta_2=2$ ; 4 -  $m_1=0,01$ ;  $\eta_2=1$ ; 5 -  $m_1=0,1$ ,  $\eta_2=1$ ; 6 -  $m_1=0,01$ ,  $\eta_2=1$   $c_3=10$ ; 7 -  $m_1=0,01$ ;  $\eta_2=1$   $c_3=2$

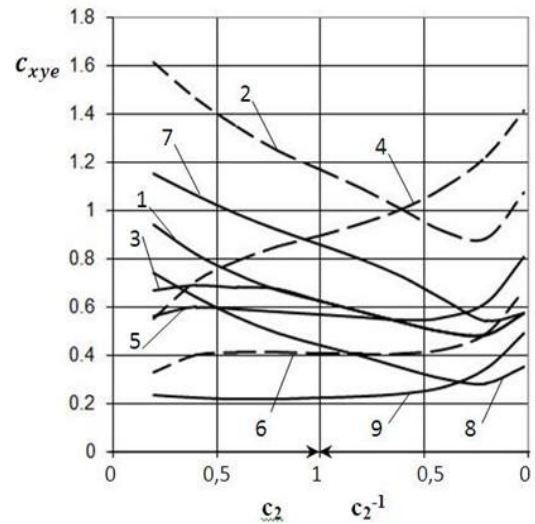


Рис. 10. Зависимость параметра  $c_{xye}$  на границе устойчивости от параметра  $c_2$  для ротора в УДП с жидкостной смазкой и внешними силами.  $\bar{f}=0,3$ ;  $c_{xy}=0,25$ ;  $m_1=0$ ;  $\bar{L}_3=\bar{L}_4=0,25$ . Для кривых 1...6 :  $\eta_1=0,25$ ;  $\eta_2=1$ ;  $\bar{L}_1=0,5$ . Для кривых 1, 3, 5  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,1$ . Для кривых 2, 4, 6 (пунктир)  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,3$ . Для кривых 7...9 :  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,1$ ;  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$ . Кривые 1 и 2 -  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$ ; кривые 3 и 4 -  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=-1$ ; кривые 5 и 6 -  $\alpha_1=-1$ ,  $\alpha_2=0$ ; кривая 7 -  $\eta_1=0,25$ ;  $\eta_2=2$ ; кривая 8 -  $\eta_1=0,25$ ;  $\eta_2=1$ ;  $\bar{L}_1=0,25$ ; кривая 9 -  $\eta_1=1$ ;  $\eta_2=1$ ;  $\bar{L}_1=0,5$

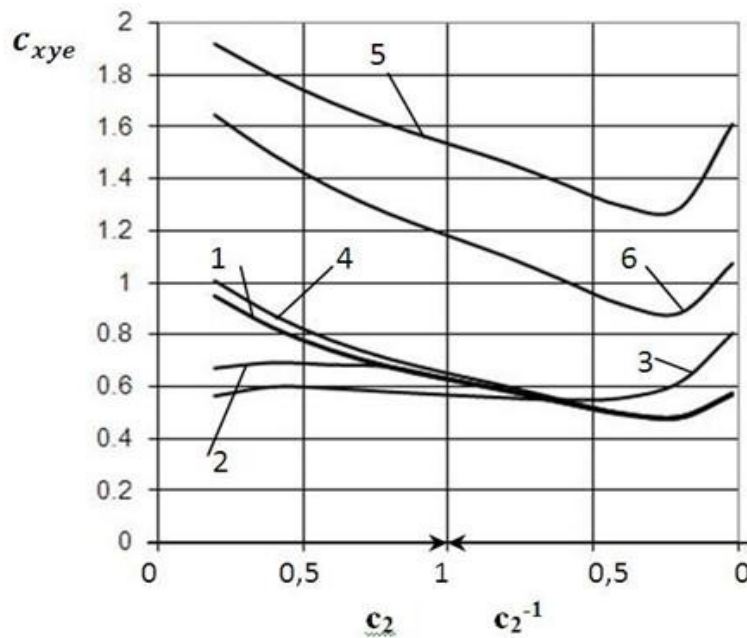


Рис. 11. Зависимость параметра  $c_{xye}$  на границе устойчивости от параметра  $c_2$  для ротора в УДП с газовой смазкой и внешними силами. Кривая 1 (базовый вариант):  $\bar{L}_1=0,5$ ,  $\bar{f}=0,3$ ;  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,1$ ,  $\eta_1=0,25$ ;  $\eta_2=1$ ;  $c_{xy}=0,25$ ;  $\bar{L}_3=\bar{L}_4=0,25$ .  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$ ;  $m_1=0,01$ ;  $c_3=10$ . Кривая 2:  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=-1$ . Кривая 3:  $\alpha_1=-1$ ,  $\alpha_2=0$ . Кривая 4:  $m_1=0,1$ . Кривая 5:  $\bar{f}=0,1$ . Кривая 6:  $\bar{f}_p\bar{\omega}=0,3$

### Выводы

Разработано методическое и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать практически все динамические характеристики роторных систем с обычными и упруго-демпферными подшипниками скольжения на границе устойчивости при действии сил смазочного слоя и внешних возмущающих сил и проектировать роторные системы с оптимальными параметрами.

Устойчивость ротора с УДП к внешней возмущающей силе при среднем и малом значениях  $c_{xy}$  слабо зависит от фактора сжимаемости смазки и относительной массы опорного элемента  $m_l$ , что при необходимости позволяет использовать для расчёта простую модель УДП с жидкостной смазкой и  $m_l=0$ .

Представленные результаты расчётов предельных коэффициентов возбуждения смазочного слоя и рабочих колёс, частотные, амплитудные и фазовые характеристики колебаний роторной системы позволяют анализировать её динамические свойства в широком диапазоне параметров.

### Библиографический список

1. Равикович, Ю. А. О динамическом поведении жёсткого ротора высокоскоростных турбомашин в подшипниках жидкостного трения [Текст] / Ю. А. Равикович // Конструкция двигателей летательных аппаратов, их прочность и надёжность. – М.: МАИ, 1991. – С. 55-60.
2. Равикович, Ю. А. Методология проектирования и динамика роторных систем высокооборотных турбомашин на подшипниках скольжения с жидкостной и газовой смазкой [Текст]: дис. докт. техн. Наук / Равикович Юрий Александрович. – М.: МАИ, 1992, – 327с.
3. Пешти, Ю. В. Газовая смазка [Текст] / Ю. В. Пешти. – М.: Моск. гос. техн. ун-т, 1993. – 381 с.
4. Ермилов, Ю. И. Устойчивость жёсткого симметричного ротора в упруго-демпферных подшипниках скольжения [Текст] / Ю. И. Ермилов // Труды МАИ, 2011.-№46,<http://www.mai.ru/science/trudy/>
5. Сергеев, С. И. Динамика криогенных турбомашин с подшипниками скольжения [Текст] / С. И. Сергеев. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.

## STABILITY OF A RIGID NONSYMMETRIC ROTOR IN ELASTIC-DAMPER SLIDING BEARINGS

© 2012 Yu. I. Ermilov

Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies)

The paper deals with the stability of a rigid nonsymmetrical rotor with elastic-damper sliding bearings to the influence of both the inner forces of the lubrication layer and to the external disturbing forces acting on the rotor. Design equations are obtained, the results of the calculations and the analysis of rotor stability with and without the action of external disturbing forces are presented for various kinds of elastic-damper bearings.

*Rotor dynamic stability, elastic-damper bearings, disturbing forces of the lubrication layer, external disturbing rotor forces.*

### Информация об авторе

**Ермилов Юрий Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: [yurer@yandex.ru](mailto:yurer@yandex.ru). Область научных интересов: высокооборотные турбомшины с лепестковыми газодинамическими подшипниками; роторная динамика.

**Ermilov Yury Ivanovich**, senior researcher, associate professor of Moscow Aviation Institute (State University of Aerospace Technologies). E-mail: [yurer@yandex.ru](mailto:yurer@yandex.ru). Area of research: high speed turbomachines with gas foil bearings; rotor dynamics.

УДК 621.981.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАПМОВКИ ПОЛИУРЕТАНОМ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ СТЕСНЁННОГО ИЗГИБА

© 2012 Е. В. Еськина, Е. Г. Громова

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)

Разработан способ изготовления профилей штамповкой полиуретаном в условиях стеснённого изгиба. На основе конечно - элементной модели проведён комплекс исследований напряжённо-деформированного состояния эластичного пуансона и заготовки, а также влияния основных параметров процесса на характеристики получаемых деталей с использованием программного продукта ANSYS. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанной модели.

*Стеcнённый изгиб, листовая заготовка, эластичная среда, конечно-элементная математическая модель, экспериментальные исследования.*

Одной из важнейших задач при изготовлении аэрокосмической техники является повышение эффективности производства, а одним из направлений - совершенствование технологий формоизменения деталей методами штамповки. Высокоэффективные методы штамповки деталей давлением полиуретана широко применимы в заготовительно-штамповочном производстве. Отличительной особенностью листовой штамповки является её высокая производительность, рациональное использование исходного материала, широкие возможности механизации и автоматизации технологических процессов, возможность изготовления жёстких деталей при небольшой их массе.

Однако процесс штамповки-гибки деталей эластомерами имеет ряд недостатков: недостаточная точность изготовления детали вследствие пружинения; невысокая прочность из-за утонения материала в зоне изгиба; малая жёсткость как следствие большого радиуса сопряжения стенки и борта. Для устранения этих недостатков используют процессы гибки листовых деталей методом стеснённого изгиба.

Широкими возможностями обладает штамповка с использованием эластомеров, основное достоинство которой – значительное упрощение, снижение металлоёмкости и стоимости технологической ос-

настки. Сочетание процессов стеснённого изгиба и использование преимуществ штамповки полиуретаном позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей профилей. Однако проводимые исследования в данном направлении не отвечают на многие вопросы, связанные с особенностями данного метода.

Таким образом, исследования по методу стеснённого изгиба с использованием полиуретана при изготовлении деталей летательных аппаратов из листовых материалов являются актуальными и позволяют решить часть проблем по повышению эффективности заготовительно-штамповочного производства.

Для достижения поставленной цели на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)» при участии авторов статьи был разработан новый способ изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана. Основными элементами конструкции штампа, необходимого для реализации данного метода, являются полиуретановый пуансон, жёсткие матрица и корпус [1].

Для изучения технологических возможностей разработанного способа изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана проводилось конечно-элементное математическое моделирование процесса стеснённого изгиба. Основными этапами математического моделирования с применением метода конечных элементов являются: 1) создание геометрической модели, пригодной для МКЭ; 2) разбиение модели на сетку конечных элементов; 3) задание свойств материалов и констант; 4) приложение к модели граничных условий (закрепление на границе или граничные нагрузки); 5) численное решение системы уравнений; 6) анализ результатов.

Для математического описания процесса деформирования использовали основные уравнения механики деформируемого тела.

В основу теоретической задачи математического моделирования положен принцип виртуальной работы, согласно которому очень малое (виртуальное) изменение внутренней энергии деформаций должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок:

$$dU = dV, \quad (1)$$

где  $U$  - энергия деформации (внутренняя работа);  $V$  - внешняя работа;  $\delta$  - символ виртуального приращения.

Нагружение тела считается квазистатическим. При этом массовые и инерционные силы не учитываются. Деформации и напряжения Мизеса вычисляются по известным формулам механики твёрдого тела.

Материал эластичного инструмента принимается гиперупругим. Для гиперупругих материалов уравнение связи между напряжениями и деформациями представляется в виде упругого потенциала (или плотности энергии деформации) Муни-Ривлина, которое имеет следующий вид для используемой в данном случае двухпараметрической модели:

$$W = a_{10}(I^*_1 - 3) + a_{01}(I^*_2 - 3) + 0,5 k (I^*_3 - 1)^2, \quad (2)$$

где  $I^*_i$  - редуцированные инварианты деформации в  $i$ -ом направлении;  $k$  - объёмный модуль;  $a_{10}, a_{01}$  - константы Муни-Ривлина для эластоплимерного материала, определяемые экспериментально.

На первом этапе исследований была создана адекватная конечно-элементная модель процесса стеснённого изгиба с использованием эластомера, представленная на рис. 1. Конечно-элементная модель содержит четыре подконструкции. Первая подконструкция моделирует жёсткую матрицу, вторая - моделирует заготовку, третья - эластичный пуансон, четвёртая - корпус. Нагружение производилось путём последовательного перемещения жёсткого корпуса вниз по оси  $Y$ . На первом этапе деформирования заготовка изгибается вначале в полуцилиндр. На следующем этапе эластичный пуансон деформируется, изгибая заготовку из полуцилиндрического в уголкового сечения по радиусу, большему минимально допустимого при обычной гибке. Окончательное деформирование заготовки производится уступами корпуса, которые передают усилие пресса на торцы изгибаемых полок.

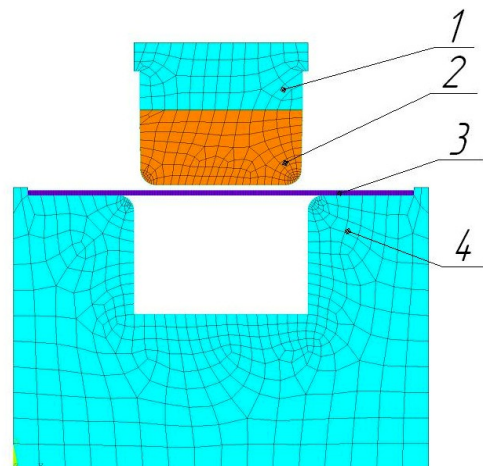


Рис. 1. Конечно-элементная модель: 1 - корпус; 2 - полиуретановый пуансон; 3 - заготовка; 4 - матрица

В реализации численных исследований коэффициент Пуассона эластоплимерного материала принимался  $\nu=0,496$ , коэффициенты трения по контактным поверхностям имеют фиксированные значения. Основными варьируемыми параметрами при



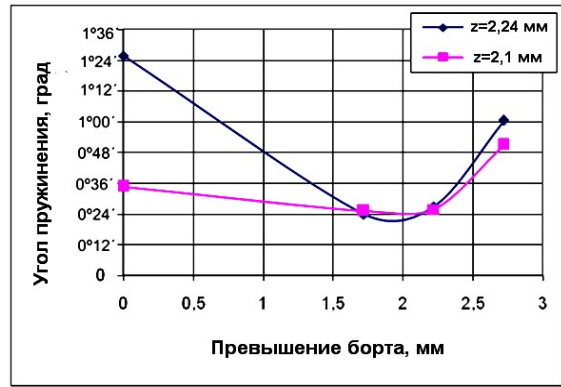
исследованиях являлись материал заготовки, превышение борта, относительная осадка полиуретанового пуансона и гарантированный зазор между пуансоном и матрицей. С использованием разработанной конечно-элементной математической модели на первом этапе исследовалось влияние превышения борта ( $\Delta H = \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \cdot \frac{\rho(r_0 + S_0)}{2}$ ) от

0 до 2,72 мм, где  $S_0, r_0$  – толщина заготовки и радиус скругления) на основные параметры детали (угол пружинения, утолщение материала в зонегиба). Исследования проводились для материалов АМцМ, АМг6М, Д16АМ, Д16АТ толщиной от 0,8 до 3 мм с радиусом скругления от 1 до 4 мм.

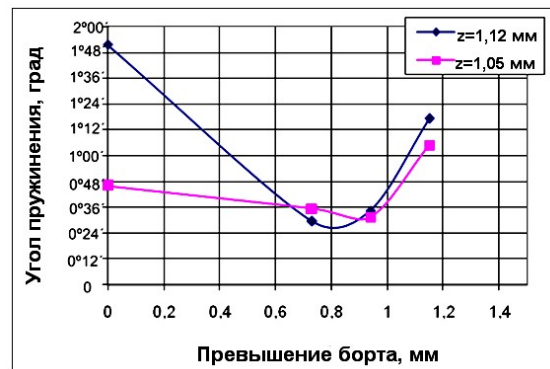
Алгоритм численного решения данной технологической задачи деформирования заготовки методом стеснённого изгиба с учётом взаимодействия с эластичным инструментом позволил проследить поэтапно весь путь деформирования заготовки и эластомера, учесть характер силового поля, свойства материалов и конструктивные параметры технологической оснастки, а также движение контактирующих поверхностей с учетом трения.

Численными исследованиями установлено, что с увеличением превышения борта угол пружинения борта уменьшается, но до определённого момента, затем увеличивается (рис. 2). При  $r/s = 1$  оптимальным значением превышения борта является 2,12 мм, при  $r/s = 2 - 0,94$  мм.

Также установлено, что с увеличением превышения борта наблюдается утолщение материала изгибаемой детали как в зонегиба, так и в изгибаемых полках. Причём при значительном превышении борта ( $\Delta H = 2,72$  мм) набор толщин происходит в большей степени в зоне вертикальной стенки, а не в зоне скругления (рис. 3), в краевой области стенки наблюдается образование гофров (рис. 4).

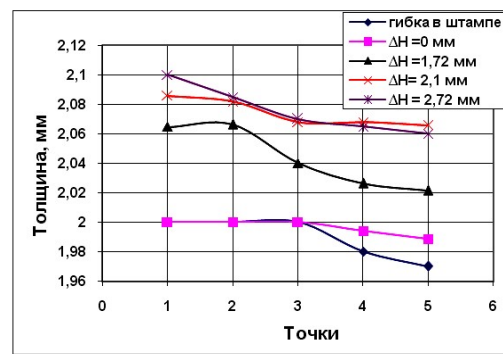


а

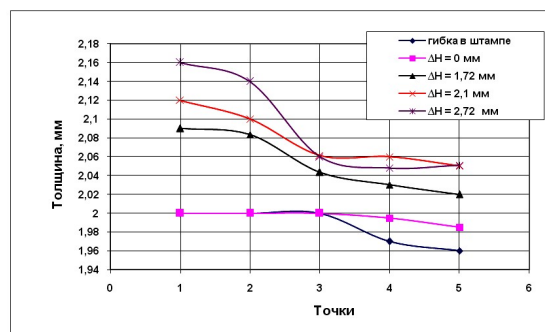


б

Рис. 2. Характер зависимости угла пружинения от превышения борта на примере материала АМг6М ( $z$  – зазор между пуансоном и матрицей): а -  $r = 2$  мм,  $s = 2$  мм; б -  $r = 2$  мм,  $s = 1$  мм



а



б

Рис. 3. Изменение толщины борта для различных значений превышения борта (материал АМг6М,  $r = 2$  мм,  $s = 2$  мм): а -  $z = 2,1$  мм; б -  $z = 2,24$  мм

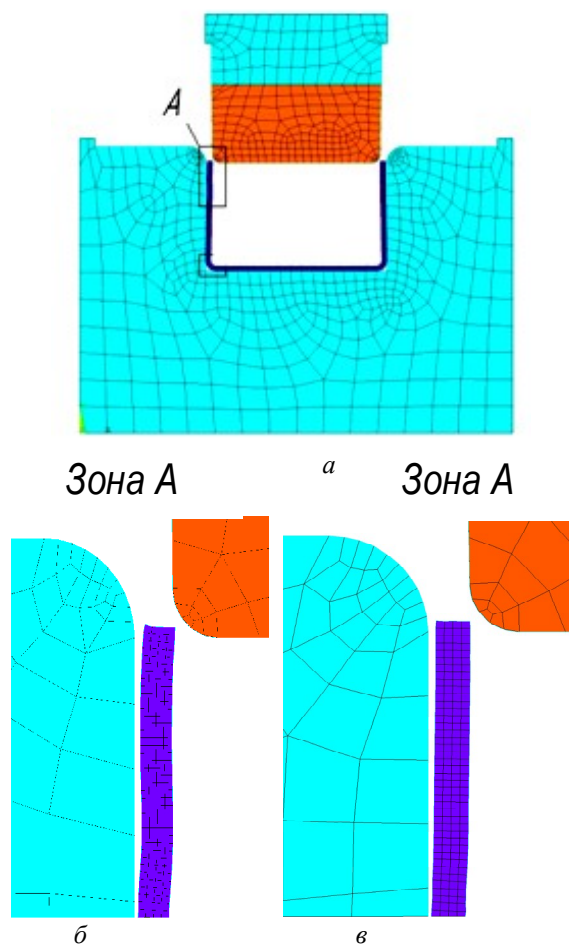


Рис. 4. Вид борта при различных превышениях борта: а - общий вид модели; б - при величине превышения борта  $\Delta H = 2,72$  мм; в) при величине превышения борта  $\Delta H = 2,12$  мм

Измерение толщины детали проводилось в пяти точках (рис. 5).

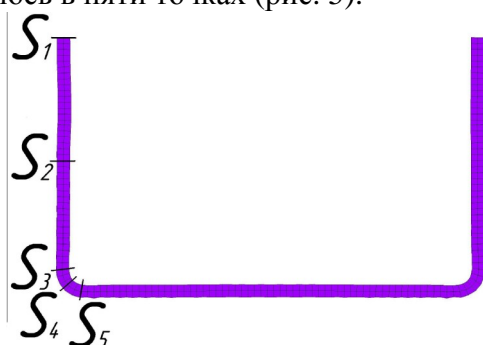


Рис. 5. Точки замера изменения толщины детали

Анализ результатов исследований первого этапа позволил также установить, что с увеличением превышения борта в зоне скругления детали возникают большие сжимающие деформации и, соответственно, напряжения, которые могут привести к воз-

никновению трещин в зоне скругления (рис. 6). Так, например, для материала заготовки АМг6М при превышении борта на 2,72 мм в зоне изгиба формируются сжимающие напряжения порядка 915 МПа, что значительно превышает прочностные параметры материала АМг6М. При превышении борта на 2,1 мм в зоне изгиба формируются максимальные сжимающие напряжения, равные 278 МПа, что ниже предела прочности  $\sigma_b = 330$  МПа.

Также рассмотрен характер влияния высоты самого борта на параметры детали. Исследование проводилось на материалах АМцМ, Д16АМ, Д16АТ, АМг6М для борта высотой 10, 20, 30, 40, 50 мм;  $r = 2$  мм,  $s = 2$  мм; превышение борта составляло 2,11 мм. При уменьшении высоты борта утолщение происходит более равномерно, при высоте борта, равной 50 мм, наблюдается потеря устойчивости борта, выражающаяся в искривлении его в осевом направлении.

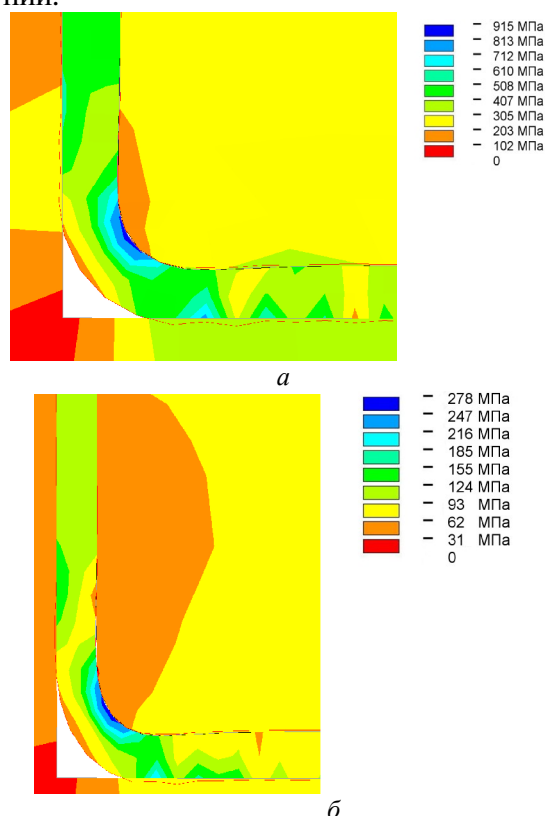


Рис. 6. Напряжённно-деформированное состояние детали из материала АМг6М в зонегиба: а - при превышении борта  $\Delta H = 2,72$  мм; б - при превышении борта  $\Delta H = 2,12$  мм

Это объясняется тем, что усилие формоизменения передается в очаг деформации через борт. В результате численных исследований установлено, что наиболее равномерного распределения материала по толщине детали удается достигнуть для материалов АМцМ и Д16АМ. Углы пружинения для этих же материалов минимальны в сравнении с другими материалами. Установлено также, что распределение утолщения для материала Д16АТ неравномерное.

На основании полученных результатов сформулированы оптимальные условия стеснённого изгиба листовых деталей с использованием полиуретана и разработаны методические указания для проектирования штамповой оснастки для проведения экспериментов.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован при участии авторов и изготовлен штамп, который позволяет реализовать новый способ изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана (рис. 7) [2]. На конструкцию штампа получен патент [3].

В экспериментальных исследованиях использовался гидравлический пресс марки РУЕ-250. С целью оценки адекватности созданных математических моделей процесса стеснённого изгиба с использованием эластомера была проведена серия экспериментов. Экспериментальное исследование влияния величины превышения борта, относительного сжатия полиуретанового пуансона и зазора между пуансоном и матрицей на качество получаемых деталей проводилось на алюминиевом сплаве АМг6М толщиной 2 мм.

В партиях поставляемых материалов производились выборочные испытания стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины Р-5. Результаты испытаний не выходили за пределы, установленные ГОСТ или ТУ.

Длину заготовки рассчитывали с учётом превышения борта  $\Delta H$ , которое согласно статье [4] равно

$$\Delta H = \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \cdot \frac{p(r_0 + S_0)}{2}. \quad (3)$$

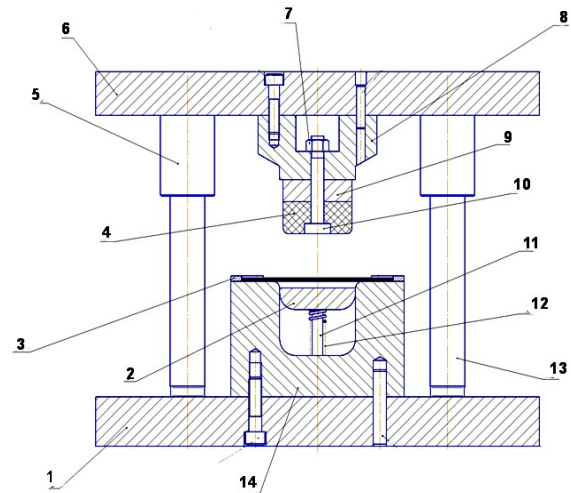


Рис. 7. Схема экспериментального штампа (Патент № 40230 РФ): 1 - нижняя монтажная плита; 2 - выталкиватель; 3 - фиксаторы; 4 - полиуретановый пуансон; 5 - направляющая втулка; 6 - верхняя монтажная плита; 7 - гайка; 8 - корпус; 9 - пуансонодержатель; 10 - болт; 11 - штилька; 12 - пружина; 13 - направляющая колонка; 14 - матрица

Для обеспечения качественного стеснённого изгиба с образованием утолщения материала в зоне радиуса изгиба при минимальных радиусах и углах пружинения необходимо, чтобы по всему сечению материала в зоне изгиба были только сжимающие тангенциальные деформации и напряжения.

Так как при этом нейтральный слойгиба должен совпадать с наружной поверхностью заготовки, её длину можно рассчитать по формуле:

$$L = \Sigma l + \pi(r_0 + S_0) + 2\Delta H, \quad (4)$$

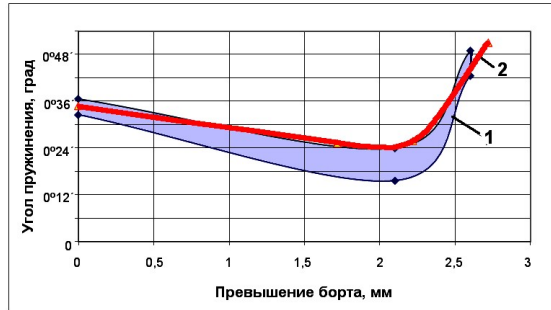
где  $\Sigma l$  - суммарная длина прямолинейных участков заготовки;  $r_0$  - внутренний радиусгиба.

Подставив значения  $\Delta H$  из (3) и преобразовав формулу (4), получим:

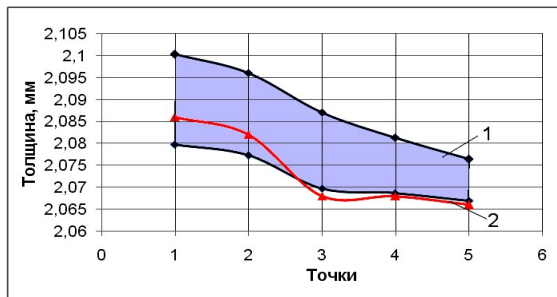
$$L = \Sigma l + \pi(r_0 + S_0) \times \left( 1 + \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \right). \quad (5)$$

Толщина уголкового зоны, толщина бортов, радиус сгиба исследовались с использованием ПО Image Expert Pro 3 на микрошлифах, приготовленных на шлифовально-полировальном станке Gripo IV по стандартной методике. Результат изме-

рения на графиках (рис. 8) представлен в виде среднего значения и области  $\epsilon$ , в которой с вероятностью 0,95 находятся полученные экспериментальные значения.



а



б

Рис. 8. Сравнение результатов экспериментальных данных (1) и математического моделирования (2) процесса деформирования материала АМгБМ,  $r = 2$  мм,  $S_{0\text{расчет.}} = 2$  мм,  $S_{0\text{экспер.}} = 1,98$  мм;  $z = 2,1$  мм: а - зависимость угла пружинения от превышения борта; б - измерение толщины борта и уголкового зоны при превышения борта  $\Delta H = 2,1$  мм

Исследование возможностей процесса деформирования тонколистовых металлов с различными механическими свойствами проводилось на материалах АМцМ, Д16АМ, АМг6М, Д16АТ. На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что математическая модель процесса стеснённого изгиба с использованием эла-

стомера имеет в целом хорошую сходимость с экспериментальными результатами с погрешностью в пределах 11-14 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальному процессу.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### Библиографический список

1. Комаров, А. Д. Разработка и исследование процесса стеснённого изгиба в штампе с использованием эластичного пуансона [Текст] / А. Д. Комаров, Е. В. Еськина, Н. Ю. Паникарова // Вестн. СГАУ, 2009, №2 (18). – С. 75-82.
2. Овчинникова Е. В. Повышение качества процесса получения деталей из листа стеснённым изгибом // Сборник научно-технических проектов финалистов и победителей конкурса идей молодых специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». - Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2007. - С. 56-66.
3. Пат. № 40230 РФ, 7 В 21 D 22/10. Штамп для изгиба листовых деталей / А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, Е. В. Овчинникова [и др.] // № 2004112655; заявл. 27.04.2004; опубл. 10.03.2004 Бюл. № 25 // открытие, изобретение. – 2004.
4. Исследование пружинения прямолинейных бортов при стеснённом изгибе листовых заготовок эластичной средой [Текст] / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. В. Соколова [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. - 1998. - №12 - С.8-11.

## RESEARCH OF THE PROCESS OF SHEET PRESSWORK USING POLYURETHANE UNDER CONSTRAINED BENDING

©2012 E. V. Eskina, E. G. Gromova

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

A method of producing profiles by polyurethane stamping under constrained bending has been developed. Research of the stressed strain state of the elastic punch and the blank has been carried out on the basis of a finite-element model. The influence of the main process parameters on the characteristics of the obtained parts has also been analysed using the ANSYS software. Experimental studies have been conducted which confirm the adequacy of the model devised.

*Constrained bending, elastic medium, sheet blank, finite element mathematical model, experimental researches.*

### Информация об авторах

**Еськина Елена Владимировна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru); [elena2002.83@mail.ru](mailto:elena2002.83@mail.ru). Область научных интересов: штамповка полиуретаном; повышение качества деталей, получаемых гибкой.

**Громова Екатерина Георгиевна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Область научных интересов: процессы формообразования методом штамповки полиуретаном; математическое моделирование.

**Eskina Elena**, candidate of technical sciences, assistant of the aircraft production and quality control in mechanical engineering department, Samara state aerospace university named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru); [elena2002.83@mail.ru](mailto:elena2002.83@mail.ru). Area of research: stamping by polyurethane, improving the quality of parts produced by bending.

**Gromova Ekaterina**, candidate of technical sciences, assistant of the aircraft production and quality control in mechanical engineering department, Samara state aerospace university named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Area of research: processes of formation by polyurethane stamping; mathematical modeling.

УДК 621.774.372

## АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ КРУГЛЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2012 В. Р. Каргин, Б. В. Каргин, С. Ю. Колесникова, Ю. А. Сергеев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)

Приведены результаты компьютерного моделирования контактных напряжений при волочении круглых изделий в конические волокна с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе DEFORM-2D.

*Математическое моделирование, нормальное давление, касательное напряжение, рабочий угол волокна, коэффициент трения, коэффициент вытяжки.*

Производительность процесса волочения круглых изделий (прутков, проволоки) во многом зависит от стойкости деформирующего инструмента. С учётом характера разрушения повышение стойкости достигается: 1 – определением преобладающего вида разрушения; 2 – выделением участков вероятного разрушения; 3 – определением причин разрушения; 4 – разработкой мер повышения стойкости волок.

При волочении круглых изделий преобладающим видом разрушения инструмента является кольцевой износ, который начинается в месте входа заготовки в рабочую зону волокна. Кольцо износа имеет вид ступеньки, которая искажает первоначальную геометрию канала, резко ухудшает условия смазки [1-3]. По данным работы [4] поверхность участка кольцевого износа составляет 8-10% поверхности рабочей зоны. Основной причиной кольцевого износа является большой градиент контактных напряжений в окрестности входа заготовки в рабочую зону [1-4].

Экспериментальные и теоретические исследования, посвящённые распределению напряжений вдоль контактной поверхности при волочении круглых изделий [2,5,6] показали, что на эпюрах распределения нормальных давлений отмечается наличие двух максимумов вблизи входа в очаг деформации и при

переходе в калибрующую часть волокна. В центре эпюр наблюдается некоторое снижение давлений. Существование седловин на эпюрах нормальных контактных напряжений впервые было обнаружено при волочении стальных прутков Павельски [6].

Практический интерес представляет дальнейшее изучение распределения не только нормальных, но и касательных напряжений на контактной поверхности при волочении круглых изделий с целью выявления их влияния на инструмент в зависимости от основных параметров процесса и геометрии волокна (рис. 1).

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование процесса волочения круглого изделия с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе DEFORM-2D [7]. Числовой расчёт волочения заготовки  $\varnothing 22$  мм из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Mn со скоростью 1 мм/с в конические волокна из стали У8 проводили с параметрами: входная зона  $36^\circ$ , выходная зона  $60^\circ$ , калибрующий поясик 5 мм. В расчётах варьировали углом обжимной зоны  $\alpha$  ( $6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ ), коэффициентом трения  $\mu$  (0,06; 0,09; 0,12; 0,15) и коэффициентом вытяжки  $\lambda$  (1,05; 1,15; 1,2; 1,35).

Для описания материала изделия принята модель упрочняющейся упруго-пластической среды. Механические свой-

ства материала заданы значениями модуля упругости  $E=70$  ГПа, коэффициента Пуассона  $\nu=0,33$ , предела текучести в зависимости от накопленной интенсивности пластических деформаций. Геометриче-

ская модель соответствует условиям осесимметричного нагружения. На поверхности контакта заготовки с волокой действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона.

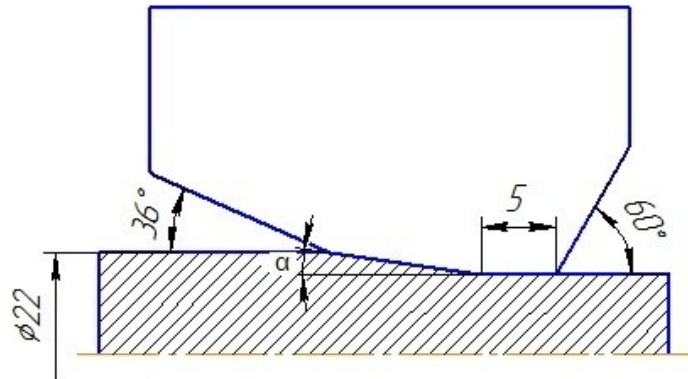


Рис. 1. Геометрия волоки

Для установления необходимого числа конечных элементов двумерной упорядоченной сетки проведено компьютерное моделирование процесса волоче-

ния круглого изделия с количеством конечных элементов  $N=500, 1000, 1500$  (рис. 2).

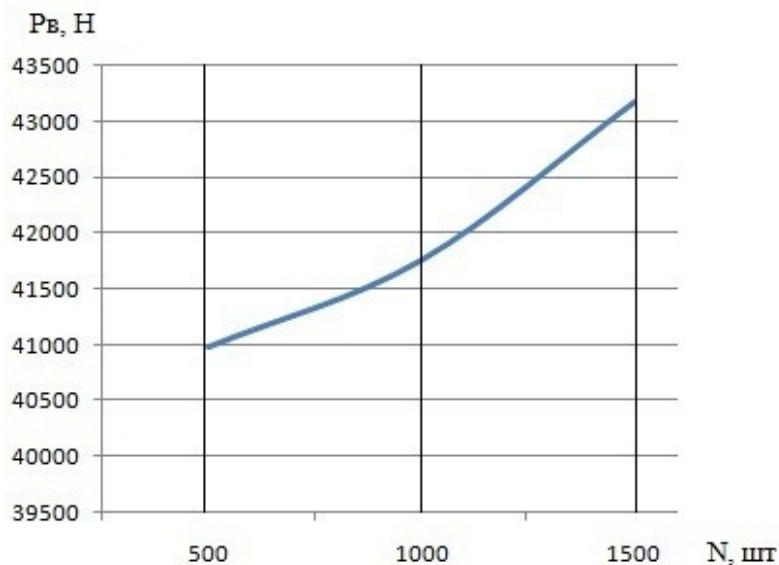


Рис. 2. Зависимость усилия волочения  $P_v$  от числа конечных элементов  $N$

По результатам моделирования принято  $N=500$ , т.к. усилие волочения  $P_v$  в диапазоне 500-1500 элементов меняется в пределах 5%, что является незначительным отклонением для инженерных расчётов.

Решение задачи методом конечных элементов на этапе установившегося процесса позволило получить зависимость

усилия волочения  $P_v$  (рис.3), распределения нормальных  $\sigma_k$  и касательных  $\tau_k$  напряжений в зоне контакта заготовка – волока от угла обжимной зоны  $\alpha$  (рис.4), коэффициента вытяжки  $\lambda$  (рис.5) и коэффициента трения  $\mu$  (рис.6). На рис. 3-5  $\xi$  – безразмерный параметр, характеризующий протяжённость обжимной зоны.

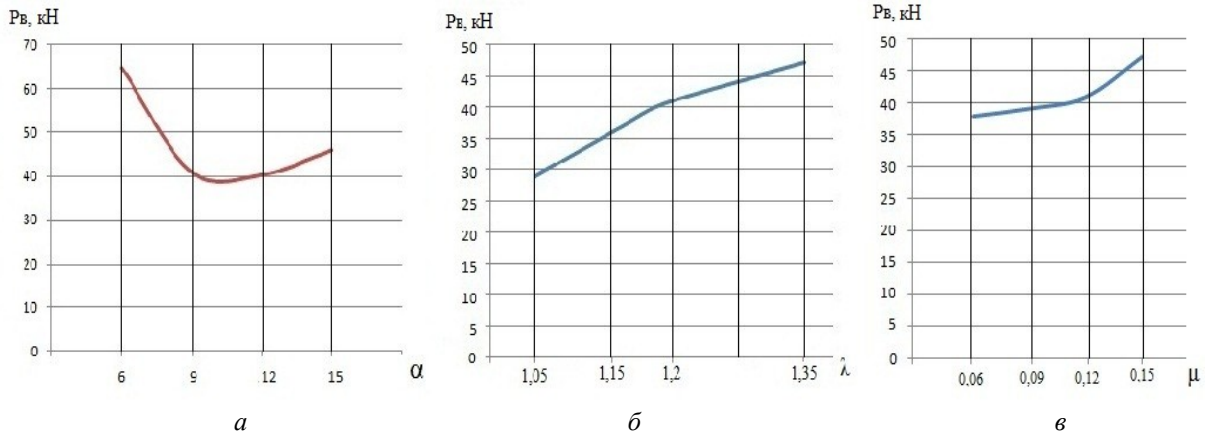


Рис. 3. Зависимость усилия волочения  $P_b$  от угла обжимной зоны при  $\mu=0,12$ ;  $\lambda=1,2$  (а), коэффициента вытяжки при  $\mu=0,12$ ;  $\alpha=12^\circ$  (б) и коэффициента трения при  $\lambda=1,2$ ;  $\alpha=12^\circ$  (в)

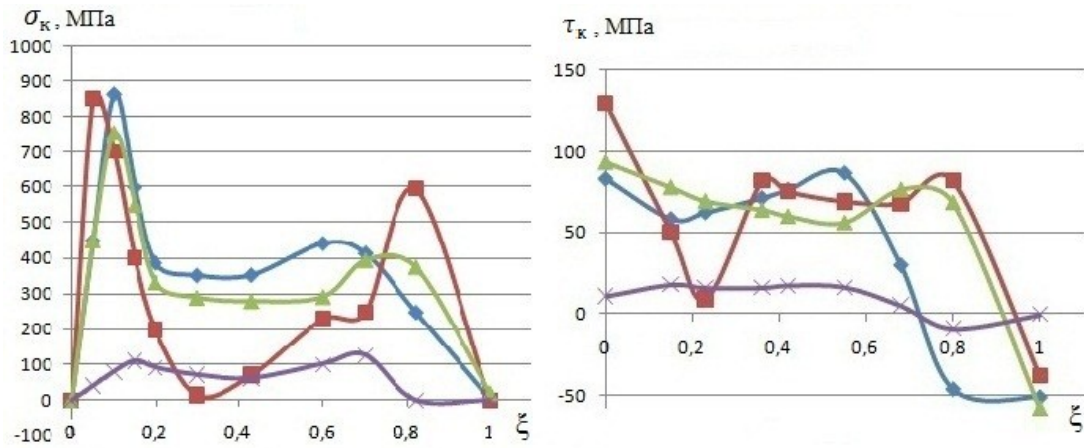


Рис. 4. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от рабочего угла волокна,  $\mu=0,12$ ;  $\lambda=1,2$ ;  
 ( —■—  $\alpha=6^\circ$ ; —▲—  $\alpha=9^\circ$ ; —◆—  $\alpha=12^\circ$ ; —×—  $\alpha=15^\circ$ )

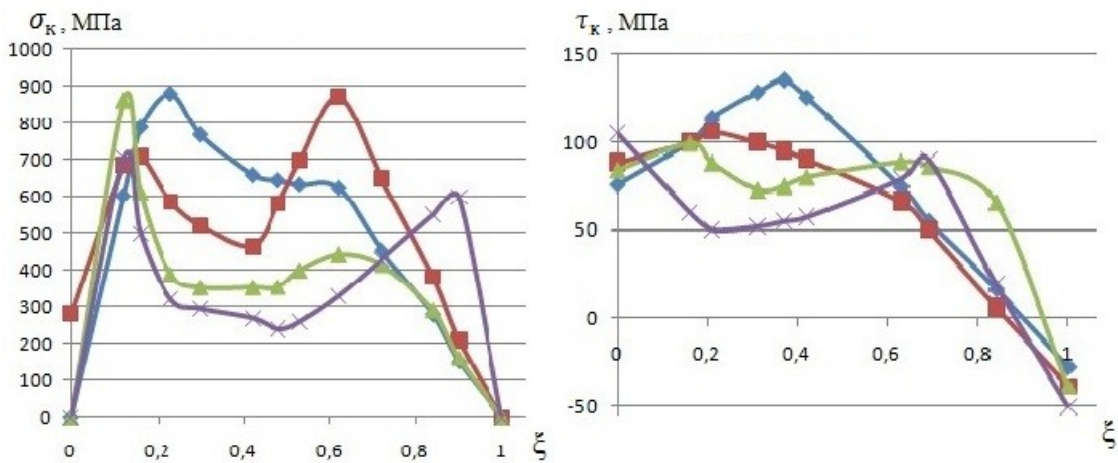


Рис. 5. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от коэффициента вытяжки,  $\alpha=12^\circ$ ,  $\mu=0,12$ ;  
 ( —◆—  $\lambda=1,05$ ; —■—  $\lambda=1,15$ ; —▲—  $\lambda=1,2$ ; —×—  $\lambda=1,35$ )



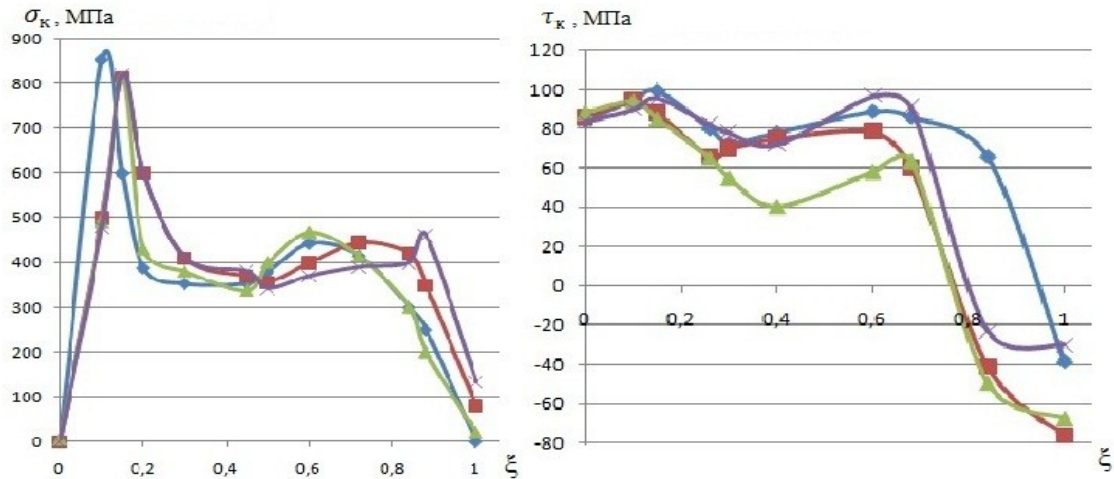


Рис. 6. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от коэффициента трения,  $\alpha=12^\circ$ ,  $\lambda=1,2$ ;  
 ( —  $\mu=0,06$ ; —  $\mu=0,09$ ; —  $\mu=0,12$ ; —  $\mu=0,15$ )

Результаты расчётов при компьютерном моделировании показывают, что распределение нормальных и касательных напряжений по длине обжимной зоны крайне неравномерное. Подтверждается наличие двух экстремумов  $\sigma_k$  в местах начала деформации в обжимной зоне волокна и при переходе обжимной зоны в калибрующий пояс. На этих участках резко меняются направления линий течения металла заготовки, возрастает угол их поворота, что и приводит к скачкообразному возрастанию нормального давления протягиваемого металла на рабочую поверхность волокна.

Положение области максимальных значений нормальных давлений  $\sigma_k$  и величина седловин на эюрах зависят в большей степени от коэффициента вытяжки и угла обжимной зоны волокна и в меньшей степени - от коэффициента трения.

Как видно из рис.4, при уменьшении угла обжимной зоны максимумы эюры распределения нормальных давлений сдвигаются влево ко входу заготовки в канал волокна и вправо - к калибрующему пояску. При росте угла  $\alpha$  нормальное давление уменьшается, особенно интенсивно при  $\alpha=15^\circ$ .

Усилие волочения при малых углах обжимной зоны волокна достигает максимальных значений, так как увеличивается контактная поверхность, что способствует повышению общего давления металла заготовки на волокно и усилия волочения (рис.3). При  $\alpha=9^\circ$  и  $\alpha=12^\circ$  усилие волочения минимально. При  $\alpha=15^\circ$   $P_v$  вновь увеличивается в связи с ростом сдвиговых деформаций.

Как видно из рис.5, максимум нормального давления на входе в обжимную зону волокна наблюдается при  $\lambda=1,05$ , а на выходе из обжимной зоны - при  $\lambda=1,15$ . Чем больше коэффициент вытяжки, тем меньше в среднем давление металла заготовки на волокно. В связи с этим канал волокна подвергается износу в большей степени при малых  $\lambda$ . Увеличение степени деформации при волочении приводит к упрочнению металла заготовки и, как следствие, к росту усилия волочения (рис.3).

Как видно из рис.6, коэффициент трения  $\mu$  не оказывает существенного влияния на распределение нормальных и касательных напряжений. Вместе с тем, с увеличением  $\mu$  можно наблюдать рост усилия волочения  $P_v$  (рис.3).

Касательные напряжения  $\tau_k$ , обусловленные трением металла заготовки о поверхность инструмента, в

среднем убывают с увеличением угла обжимной зоны, коэффициентов вытяжки и трения (рис.4-6). На выходе из обжимной зоны волокни  $\tau_k$  меняют направления действия касательных напряжений, что приводит к дополнительным нагрузкам канала волокни. Чем больше угол  $\alpha$ , тем

равномернее распределение  $\tau_k$  по длине обжимной зоны. При  $\lambda=1,05$  касательные напряжения максимальны в середине обжимной зоны, при других коэффициентах вытяжки  $\tau_k$  максимально на входе и выходе из обжимной зоны.

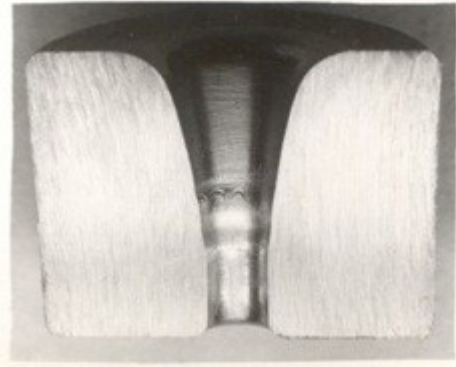


Рис. 7. Внешний вид канала изношенной волокни

На рис. 7 при разрезе волокни после эксплуатации вдоль образующей отчётливо видны кольца износа на входе и выходе из обжимной зоны. Глубина выходного кольца износа меньше входного в два раза. Расположение колец

износа совпадает с экстремумами нормальных давлений в канале волокни, полученными в процессе моделирования, представленными на рис.8 в виде линий равного уровня.

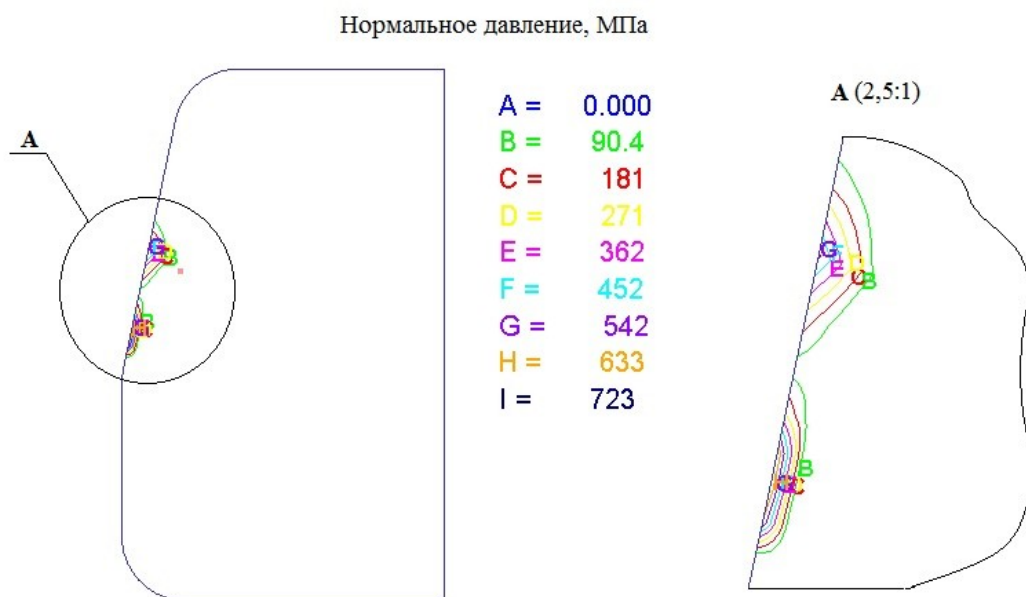


Рис. 8. Линии равного уровня распределения нормального давления в рабочем канале волокни

В связи с изложенным для повышения стойкости волок рекомендуется локальное упрочнение кольцевых зон на входе и выходе из обжимной зоны волокна, например, с помощью лазерной обработки, азотирования.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Характер распределения напряжений в зоне контакта заготовка-волокна отличается значительной неравномерностью, что связано с резким изменением траектории течения металла при волочении.

2. Расположение зон максимальных значений контактных напряжений зависит от угла обжимной зоны волокна и коэффициента вытяжки, тогда как коэффициент трения не оказывает особого влияния на данные параметры.

3. Экспериментально подтверждено наличие не одного, а двух колец износа в канале волокна.

#### Библиографический список

1. Перлин, И. Л. Теория Волочения [Текст] / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

2. Леванов, А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением [Текст] / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

3. Чертавских, А. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением [Текст] / А. К. Чертавских, В. К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1958. – 364 с.

4. Грошев, П. Ф. Исследования износа волок методом радиоактивных индикаторов [Текст] / П. Ф. Грошев // Цветные металлы. - 1961. - №3. - С 71-75.

5. Щукин, С. В. Исследование на базе конечных элементов напряжённо-деформированного состояния проволоки при волочении [Текст] / С. В. Щукин, Ю. И. Рыбин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1993. - №6. - С. 31-34.

6. Pawelski, O. - Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1967. - №12.- С.899-904.

7. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM – 2D [Текст] / В. Р. Каргин, А. П. Быков, Б. В. Каргин и др. – Самара: Изд-во МИР, 2011. – 170 с.

## ANALYSIS OF CONTACT STRESSES IN DRAWING ROUND PRODUCTS

© 2012 V. R. Kargin, B. V. Kargin, S. Y. Kolesnikova, Y. A. Sergeev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

In this work, the drawing of round products in conical dies was simulated by the finite element method (FEM) using special-purpose software DEFORM-2D to analyze contact stresses.

*Mathematical modeling, normal pressure, shear stress, die working angle, friction coefficient, coefficient of extraction.*

#### Информация об авторах

**Каргин Владимир Родионович**, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [vrkargin@mail.ru](mailto:vrkargin@mail.ru). Область научных интересов: разработка процессов производства профилей и труб.

**Каргин Борис Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [bkargin@mail.ru](mailto:bkargin@mail.ru). Область научных интересов: технология прокатно-прессового производства.

**Колесникова Светлана Юрьевна**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [ana-kolesnikova@mail.ru](mailto:ana-kolesnikova@mail.ru). Область научных интересов: компьютерное моделирование процесса волочения круглых изделий.

**Сергеев Юрий Александрович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [sergeev-yurok@mail.ru](mailto:sergeev-yurok@mail.ru). Область научных интересов: компьютерное моделирование процесса волочения круглых изделий.

**Kargin Vladimir Rodionovich**, Sc.D., professor of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vrkargin@mail.ru](mailto:vrkargin@mail.ru). Area of research: development of section and tubing production processes.

**Kargin Boris Vladimirovich**, candidate of science, lecturer of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [bkargin@mail.ru](mailto:bkargin@mail.ru). Area of research: rolling and extrusion technology.

**Kolesnikova Svetlana Yurievna**, master student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [ana-kolesnikova@mail.ru](mailto:ana-kolesnikova@mail.ru). Area of research: computer simulation of the process of drawing round products.

**Sergeev Yuri Alexandrovich**, master student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sergeev-yurok@mail.ru](mailto:sergeev-yurok@mail.ru). Area of research: computer simulation of the process of drawing round products.

УДК 621.431.75+621.82

## РАСЧЁТ СКОЛЬЖЕНИЯ В МЕЖВАЛЬНЫХ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКАХ ГТД

© 2012 В. В. Макаrchук<sup>1</sup>, Е. П. Жильников<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Завод авиационных подшипников», г. Самара<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В работе приводятся методика и результаты расчётов скольжения в высокоскоростных межвальных роликовых подшипниках. Приводятся сравнения результатов экспериментальных исследований проскальзывания роликовых подшипников на стенде, имитирующем условия работы подшипников опор авиационных ГТД, с расчётами по компьютерной модели межвального роликового подшипника.

*Подшипники роликовые, скольжение, изнашивание.*

Проскальзывание комплекта тел качения и связанные с ним дефекты рабочих поверхностей являются наиболее распространённой причиной потери работоспособности межвальных подшипников авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1].

В работе В. И. Акифьева и А. И. Данильченко [2] предложена методика расчёта проскальзывания высокоскоростного роликоподшипника. Однако расчёт кинематики подшипника выполняется из предположения, что силы трения в контактах роликов с кольцами определяются на базе эластогидродинамики без учёта шероховатости поверхностей. Вместе с тем подшипники авиационных двигателей работают, как правило, в условиях, когда наблюдается неполное разделение рабочих поверхностей сплошным смазочным слоем. В этом случае, как показано в [3], силы трения будут определяться как свойствами эластогидродинамического смазочного слоя, так и взаимодействием вершин микронеровностей шероховатых поверхностей.

Разработана методика расчёта кинематики и скольжения в высокоскоростном межвальном роликовом подшипнике с учётом шероховатости рабочих поверхностей деталей подшипника [4].

**Геометрические характеристики и радиальные зазоры подшипника** в рабочих условиях будут зависеть от рабочих температур деталей, расширения под действием центробежных сил и посадочных натягов. При этом величины посадочных натягов, в свою очередь, зависят от температурного и центробежного расширения деталей.

Диаметральный зазор в подшипнике в рабочих условиях изменяется в зависимости от посадочных натягов колец, температурного, а также центробежного расширения колец подшипника и деталей подшипникового узла.

Увеличение наружного диаметра центрирующей поверхности сепаратора определяется температурным расширением и центробежным расширением вращающегося сепаратора. Тогда зазор «плавления» сепаратора  $g_{nl}$  в рабочих условиях будет равен разности диаметров центрирующих поверхностей.

Экспериментальные исследования показывают существенное влияние формы контакта торцов роликов и направляющих бортиков на проскальзывание в роликовых подшипниках. В настоящей работе рассмотрим стандартный вариант – контакт плоских торцов ролика и направляющего бортика.

На кинематику подшипника оказывает влияние также момент трения торца

ролика в контакте с гнездом сепаратора. Рассмотрим также простейший вариант сепаратора в виде кольца с гнездами для роликов.

Геометрические характеристики контактов комбинированных роликов с беговыми дорожками колец рассмотрены в [4]. В настоящей работе рассмотрим характеристики контактов колец с роликами, образующая которых описывается радиусом.

По рекомендациям [4] расчёт толщин эластогидродинамических смазочных слоев в контактах выполняется по формуле:

$$h_0 = 1,864 P_S^{0,723} P_U^{0,558} P_N^{0,167} R_{np} / K_p,$$

$$\text{где } K_p = 1 + P_T^{0,65} \lg(0,9 P_S^{0,114} P_U^{0,285} P_N^{0,085}).$$

Безразмерные параметры в приведенных формулах определяются соотношениями:

$$P_S = m_0 U_{\Sigma} / (E_{np} R_{np}); \quad P_U = a E_{np};$$

$$P_N = E_{np} R_{np} \Delta l / F_m(i); \quad P_T = m_0 b / I_c.$$

Здесь  $m_0 = m_0(t_c)$  - динамическая вязкость смазки;  $a = a(t_c)$  - пьезокоэффициент вязкости смазки;  $I_c = I_c(t_c)$  - коэффициент теплопроводности смазки;  $b$  - коэффициент зависимости вязкости от температуры;  $E_{np}$  - приведённый модуль упругости в контакте;  $F_m(i)/\Delta l$  - нагрузка на единицу длины в среднем сечении линии контакта;  $t_c$  - температура смазки в зоне контакта;  $U_{\Sigma}$  скорость качения в зоне трения.

Степень жидкостного трения, характеризующая наличие металлического контакта микронеровностей шероховатых поверхностей, определится критерием, предложенным Т. Тальяном:

$$I = h_0 / \sqrt{R_{av}^2 + R_{a1}^2}.$$

Здесь  $R_{av}$  - среднее арифметическое отклонение микронеровностей поверхности ролика. В качестве  $R_{a1}$  принимается среднее арифметическое отклонение микронеровностей поверхности

беговой дорожки внутреннего  $R_{ав}$  или наружного  $R_{ан}$  колец, соответственно.

С использованием критерия  $I$  относительная площадь металлического контакта микронеровностей вычисляется по формуле [3]:

$$h = 0,25 - \Phi(I)/2.$$

Здесь  $\Phi(I)$  - интеграл вероятности.

Коэффициент трения в контакте с учётом металлического контакта определим суммой

$$f = f_{мет} h + f_{см} (1-h).$$

Коэффициент трения  $f_{мет}$  в контактах микронеровностей принимается по рекомендациям [5].

Коэффициент трения, определяемый сдвигом смазочного слоя, рассчитывается по соотношению:

$$f_{см} = W \Delta l / F_m(i).$$

Здесь  $W$  - сила трения, отнесённая к единице длины линии контакта и определяемая по формуле:

$$W = 2 m_0 U_S J / h_0 \pm p_0 h_0.$$

Выражение для интеграла  $J$  имеет вид

$$J = b_m \Phi(x_a) \exp(a p_0) \sqrt{p/a p_0},$$

где  $\Phi(x_a)$  - интеграл вероятности, в котором предел интегрирования определяется по формуле:

$$x_a = \sqrt{2 a p_0}.$$

При расчётах для контакта с внутренним кольцом принимаем  $p_0 = s_{\epsilon}(i)$ , для контакта с наружным кольцом -  $p_0 = s_{\eta}(i)$ .

В формуле для расчёта  $W$  знак «+» принимается для поверхности, имеющей большую величину окружной скорости.

В приведённых расчётах вязкость смазки зависит от температуры. В этой связи расчёт коэффициента трения выполняется итерационным методом.

Температура смазки принимается равной температуре соответствующего кольца. Определяются вязкость смазки, толщина смазочного слоя и коэффициент трения. С использованием формулы Бло-

ка определяется приращение температуры в зоне трения:

$$\Delta t = 0,83 f (F_m(i) / \Delta l) U_S / (\sqrt{b_m(i)} \times (\sqrt{I_n g_n c_n V_n} + \sqrt{I_w g_w c_w V_w}))$$

Здесь  $I_n$  и  $I_w$  - коэффициенты теплопроводности;  $g_n$  и  $g_w$  - плотность;  $c_n$  и  $c_w$  - удельная теплоёмкость материалов колец подшипника и роликов, соответственно;  $V_n$  и  $V_w$  - скорости поверхностей беговых дорожек колец и роликов;  $U_S$  скорость скольжения.

Уточнённое значение температуры смазки определяется суммированием

$$t_{cv} = t_n + 2\Delta t / 3$$

Расчёт повторяется до сходимости с заданной точностью принятого и уточнённого значений температуры смазки.

После уточнений температуры смазки и коэффициента трения определяется сила трения скольжения в контакте

$$F_f = fF(i),$$

где  $F(i)$  - нагрузка в контакте ролика с внутренним или наружным кольцом.

При расчёте сил трения в контакте торца ролика с направляющим бортиком наружного кольца учитываем, что между торцами ролика и направляющего бортика предусмотрен зазор  $\Delta_{\delta}$ . Величина зазора  $\Delta_{\delta p}$  в рабочих условиях определяется с учётом температурного расширения.

Принимаем, что между каждым из торцов ролика и гнезда сепаратора устанавливается смазочный слой толщиной

$$h_{\delta} = \Delta_{\delta p} / 2$$

При вращении ролика касательные напряжения в слое смазки определяются по формуле Ньютона:

$$t = m_0 V_{s\delta} / h_{\delta}$$

где  $V_{s\delta}$  - скорость скольжения.

При расчётах вязкость смазки принимаем в зависимости от температуры наружного кольца подшипника.

Скорость скольжения  $V_{s\delta}$  определяем для среднего сечения площадки контакта. При этом, если скорость торца бортика  $V_{\delta}$  больше скорости ролика  $V_{w\delta}$ , то сила трения в контакте является ведущей для ролика, иначе - тормозящей и имеющей отрицательный знак.

**Усилие взаимодействия роликов с перемычкой сепаратора** определяется суммой

$$F_S(i) = \pm F_{fe} \pm F_{fn} \pm 2F_{f\delta}$$

Здесь  $F_{fe}$ ,  $F_{fn}$  и  $F_{f\delta}$  - силы трения в контактах ролика с внутренним и наружным кольцами и бортиком. Знак «+» выбирается, если скорость поверхности ролика меньше скорости соответствующей поверхности колец в контакте.

С полученным значением усилия взаимодействия определяется напряжение в контакте и полуширина площадки контакта.

Расчёт толщины эластогидродинамического смазочного слоя и силы трения в контакте выполняется как для контакта ролика с кольцом. Приращение температуры в зоне трения определяем при одной не движущейся относительно источника тепловыделения поверхности.

**Момент трения между торцами ролика и гнезда сепаратора** определяем, принимая, что между каждым из торцов ролика и гнезда сепаратора в рабочих условиях устанавливается смазочный слой толщиной, равной половине зазора между торцами.

При расчётах вязкость смазки принимаем в зависимости от средней температуры подшипника.

**Расчёт контакта сепаратора с центрирующей поверхностью бортика наружного кольца** выполним как узкого подшипника скольжения [6].

Усилие прижатия сепаратора к центрирующей поверхности определим по формуле:

$$F_{RS} = F_{cs} + \sqrt{F_{SB}^2 + F_{ST}^2}$$

Здесь  $F_{cs}$  - центробежная сила при смещении сепаратора.

Составляющие усилия прижатия роликами по координатным осям определяются суммированием проекций усилий взаимодействия роликов с перемычкой сепаратора:

$$F_{SB} = \sum_{i=1}^z (F_s(i)\sin(j) - F_{fs}(i)\cos(j));$$

$$F_{ST} = \sum_{i=1}^z (F_s(i)\cos(j) + F_{fs}(i)\sin(j)).$$

Определяются вязкость смазки, толщина смазочного слоя и коэффициент трения при температуре, равной температуре наружного кольца подшипника.

Приращение температуры в зоне трения определяем при одной не движущейся относительно источника тепловыделения поверхности.

После уточнений температуры смазки и коэффициента трения определяется момент трения скольжения сепаратора по центрирующей поверхности.

**При расчёте кинематики ролика** скорости поверхностей колец (рис.1) в обратном движении (при остановленном сепараторе) определяются по формулам:

$$V_e = d_{ep} (w_0 - w_e)/2 \text{ - для внутреннего кольца;}$$

$$V_n = D_{np} (w_n - w_0)/2 \text{ - для наружного кольца.}$$

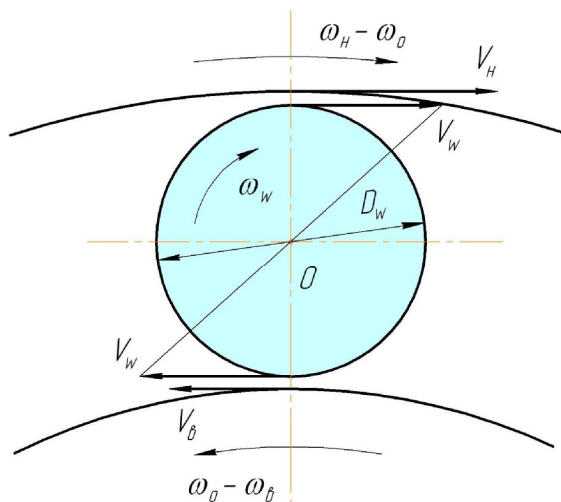


Рис. 1. Схема скоростей поверхностей межвального подшипника

Ведущим в межвальном подшипнике является наружное кольцо. В этой

связи поверхность ролика будет иметь проскальзывание некоторой величины относительно кольца. Тогда принимаем  $V_w = V_n(1 - e_w)$ , где  $e_w$  - относительная величина проскальзывания ролика в контакте с наружным кольцом. При этом угловая скорость вращения ролика относительно собственной оси будет равна  $w_w = 2V_w/D_{wp}$ .

Скорости скольжения ролика в контактах с кольцами будут равны:

$$V_{se} = V_w - V_e \text{ - для внутреннего кольца;}$$

$$V_{sn} = V_n - V_w \text{ - для наружного кольца.}$$

На рис. 2 приведена схема сил, действующих на ролик в нагруженной зоне.

Здесь  $F_S$  и  $F_{fs}$  - нормальное усилие и сила трения в контакте ролика с перемычкой сепаратора;  $F_c$  - центробежная сила ролика.

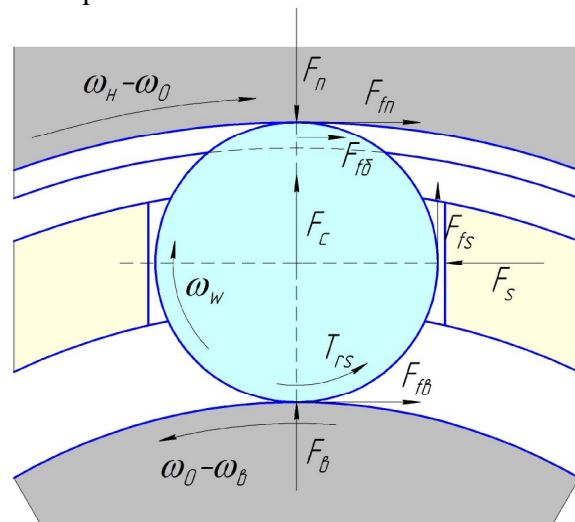


Рис. 2. Схема сил в контактах ролика в нагруженной зоне

Условие равновесия сил в радиальном направлении определяется выражением:

$$F_n = F_e + F_{fs} + F_c.$$

Здесь  $F_e$ ,  $F_n$  - усилия в контактах ролика с внутренним и наружным кольцами.

В связи с малостью величины силы трения  $F_{fs}$  уравнение равновесия в радиальном направлении можно привести к



виду

$$F_n = F_g + F_c.$$

Это упрощение позволяет решать задачу о распределении нагрузки по телам качения без учёта сил трения в контактах.

Силы трения  $F_{f\sigma}$  и  $F_{fs}$  определяются, как показано ранее. Центробежная сила ролика определяется по формуле:

$$F_c = m_w (D_{np} - D_{wp}) w_0^2 / 2.$$

Как показано ранее, все силы трения определяются скоростями скольжения в контактах, которые, в свою очередь, определяются скоростью вращения ролика относительно собственной оси.

Третьим уравнением равновесия является уравнение моментов:

$$\sum T(\epsilon_w) \equiv (F_{fn} - F_{f\sigma} - F_{fs}) D_{wp} / 2 + F_{f\sigma} (D_{wp} - (D_{np} - D_{\sigma 1}) / 2) - T_{sc} - T_{kn} - T_{kb} = 0.$$

Здесь моменты сопротивления качению ролика определим по приближённым зависимостям:  $T_{kn} = f_k F_n$  и  $T_{kb} = f_k F_g$ , где  $f_k$  - коэффициент трения качения.

Разделив на радиус ролика, получим

$$\sum T(\epsilon_w) \equiv F_{fn} - F_{f\sigma} - F_{fs} + 2F_f (1 - (D_{np} - D_{\sigma 1}) / 2D_{wp}) - 2(T_{sc} + T_{kn} + T_{kb}) / D_{wp} = 0.$$

Полученное уравнение является функцией одной переменной  $\epsilon_w$ . Его решение выполняется итерационным методом Ньютона. При этом производную функции заменяем отношением приращений функции и аргумента.

В результате получаем величину угловой скорости вращения ролика  $w_w$  и усилие  $F_s$  - нагрузки в контакте ролика с перемычкой сепаратора.

Рассматривается также кинематика ролика в ненагруженной зоне.

Таким образом, в межвальном подшипнике все ролики являются «ведущими» по отношению к сепаратору. В то же время в подшипнике с вращающимся внутренним и не вращающимся наруж-

ным кольцами ролики в разгруженной зоне являются «тормозящими» и «толкаются» сепаратором. Это объясняет установленное экспериментально небольшое по величине скольжение сепаратора в межвальном подшипнике. Однако при этом наблюдается повышенное скольжение в контактах ролика с кольцами, что может привести к повышенному изнашиванию.

**Расчёт сопротивления движению сепаратора** в воздушно – масляной среде подшипника выполним по рекомендациям [7].

Температуру воздушно – масляной среды примем равной средней температуре подшипника

$$t_{см} = (t_g + t_n) / 2.$$

Масло в подшипнике не полностью заполняет весь свободный объём. В этой связи расчётное значение плотности воздушно–масляной среды рекомендуется в зависимости от объёмной доли смазки  $O_{дсм}$  в полости подшипника по формуле:

$$\gamma_{cp} = \gamma_{см} O_{дсм}^2 / (0,4 + 0,6 \cdot O_{дсм}).$$

Характер движения сепаратора в воздушно – масляной среде определяется числом Рейнольдса, которое в данном случае вычисляется по формуле:

$$Re = R_c^2 w_s / \eta.$$

Момент сопротивления движению сепаратора в воздушно – масляной среде рекомендуется определять по формуле:

$$T_{ts} = C_n g_{cp} w_s^2 (R_c^5 - r_c^5 + 2,5 B_s (R_c^4 + r_c^4)).$$

Здесь  $R_c$  и  $r_c$  - радиусы боковой поверхности сепаратора, характеризующего сопротивление вращению его в масляной среде;  $B_s$  - ширина наружной поверхности сепаратора;  $C_n$  - коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса.

Как показано выше, усилия взаимодействия роликов с перемычками сепаратора являются «ведущими», обеспечивающими вращение сепаратора. Величина момента сил взаимодействия роликов с перемычками сепаратора определится по формуле:

$$T_S = \sum_{i=1}^z (F_S(i)(D_{np} - D_{wp})/2 - F_{fs} D_{wp}/2).$$

Кроме того, «ведущим» для сепаратора межвального подшипника является момент от силы трения сепаратора в контакте с центрирующими поясками вращающегося наружного кольца. Его величина определяется по формуле:

$$T_{sб} = fF_{RS}D_{s1}.$$

Здесь  $F_{RS}$  - усилия прижатия сепаратора и  $f$  - коэффициент трения в контакте, определяемые как показано ранее.

Соппротивление вращению сепаратора межвального подшипника будет только от момента трения  $T_{ts}$  от перемешивания воздушно – масляной среды в полости подшипника.

Величины всех моментов  $T_S$ ,  $T_{sб}$  и  $T_{RS}$  зависят от угловой скорости вращения сепаратора.

Величину угловой скорости сепаратора, в свою очередь, можно определить по формуле:

$$\omega_0 = \omega_{00}(1 - \epsilon_0).$$

Здесь  $\epsilon_0$  - коэффициент скольжения;  $W_{00}$  - теоретическое (при отсутствии скольжения) значение угловой скорости вращения сепаратора, величина которого определяется по известной формуле:

$$W_{00} = (d_{ep} w_{\epsilon} + D_{np} w_n) / (2(D_{np} - D_{wp})).$$

Принимаем условие  $W_0 \leq W_n$ . Тогда с использованием выражений для  $W_0$  и  $W_{00}$  получим

$$\epsilon_0 \geq \frac{(w_{\epsilon} - w_n)(1 - D_{wp}/D_{np})}{2W_{00}}.$$

Условие равновесия при равномерном вращении сепаратора будет иметь вид

$$\Phi(\epsilon_0) \equiv T_S + T_{sб} - T_{RS} = 0.$$

Получено уравнение, являющееся функцией одной переменной  $\epsilon_0$ . Его решение выполняется итерационным методом Ньютона. При этом производную

функции заменяем отношением приращений функции и аргумента.

В результате получаем величину угловой скорости вращения сепаратора  $W_0$ , величину скольжения  $\epsilon_0$  и усилие и температуры в контактах роликов с кольцами и сепаратором.

**Исследование проскальзывания** выполним для межвального подшипника 55-2672919P5 изделия "99В".

При расчётах скольжения сепаратора принята минимальная радиальная нагрузка  $F_r = 50$  Н. Перекос колец принят равным нулю. Скорости вращения колец приняты соответствующими режимам работы подшипника в двигателе.

Температура наружного кольца принята равной  $43^{\circ}\text{C}$ , внутреннего –  $47,3^{\circ}\text{C}$ . Монтажный радиальный зазор в подшипнике принят равным  $g = 0,043$  мм. На рис. 3 и 4 приведены зависимости скольжения сепаратора от разности частот вращения наружного и внутреннего колец (скольжения роторов) при постоянной частоте вращения наружного или внутреннего колец.

При этом постоянная частота вращения наружного кольца (рис.3) принята равной  $n_n = 13067$  об/мин, а частота вращения внутреннего кольца (рис.4) соответственно -  $n_{\epsilon} = 8152$  об/мин.



Рис.3. Зависимость проскальзывания от скольжения роторов при  $n_n = 13067$  об/мин

Зависимость на рис. 3 показывает, что скольжение сепаратора увеличивается с увеличением скольжения роторов. Эта

зависимость монотонная, так как при постоянной частоте вращения наружного кольца с увеличением частоты вращения внутреннего кольца уменьшается не только скольжение роторов, но и рабочее значение радиального зазора вследствие центробежного расширения внутреннего кольца.

Зависимость на рис. 4 не монотонная. При постоянной частоте вращения внутреннего кольца с увеличением частоты вращения наружного кольца увеличивается рабочее значение радиального зазора от центробежного расширения наружного кольца. Вследствие этого уменьшается число роликов в зоне нагружения, что должно привести к отставанию сепаратора, т.е. к увеличению проскальзывания. Одновременно увеличивается скольжение роторов. Для случая, когда скорость вращения наружного кольца больше скорости вращения внутреннего, это может, как показали результаты эксперимента, привести к увеличению скорости вращения сепаратора.

Следовательно, уменьшается скольжение (увеличивается отрицательное значение проскальзывания).



Рис. 4. Зависимость проскальзывания от скольжения роторов при  $n_6 = 8152$  об./мин.

Таким образом, зависимость скольжения сепаратора от частоты вращения наружного кольца имеет сложный характер.

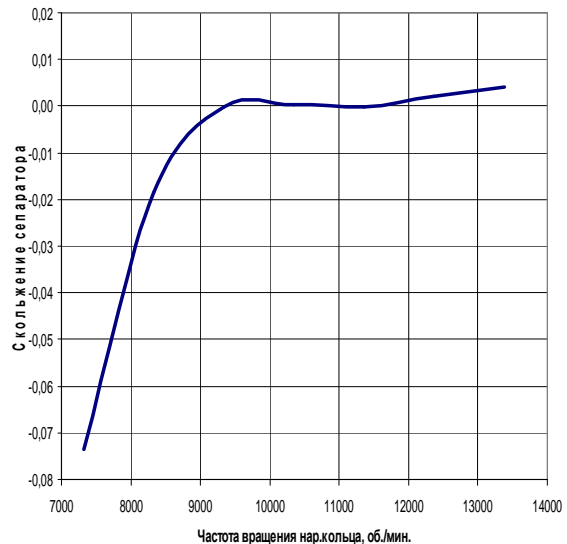


Рис. 5. Зависимость проскальзывания от частоты вращения наружного кольца при  $n_n - n_6 = 4300$  об./мин

На рис. 5 приведена зависимость скольжения сепаратора от одновременного увеличения частот вращения внутреннего и наружного колец при постоянной разности скоростей.

Результаты расчётов показывают, что скольжение сепаратора зависит как от величины скольжения роторов, так и от величин скоростей вращения колец.

На рис. 6 приведена зависимость скольжения сепаратора от радиальной нагрузки при температуре наружного кольца  $33^\circ\text{C}$  и частотах вращения колец:  $n_6 = 5180$  об./мин и  $n_n = 11313$  об./мин. Результаты расчётов показывают известное уменьшение скольжения сепаратора с увеличением радиальной нагрузки на подшипник.

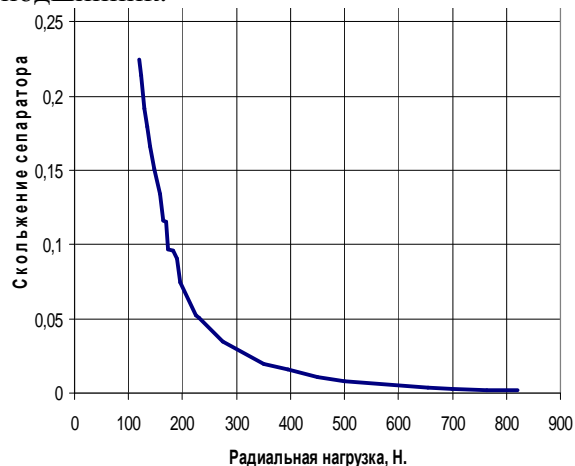


Рис. 6. Зависимость скольжения сепаратора от радиальной нагрузки

На рисунке 7 приведены результаты испытаний подшипника 55-2672919P5 при различных значениях радиального зазора при смазке маслом ИПМ – 10 [8]. Величины проскальзывания сепаратора приведены в зависимости от частоты вращения наружного кольца. При этом частоты вращения внутреннего кольца соответствовали режимам работы подшипника в изделии.

Получено уменьшение проскальзывания с выходом оборотов колец на режим полного газа. Это противоречит общепринятым представлениям об увеличении проскальзывания с увеличением частоты вращения подшипника. Однако, по нашему мнению, в межзальных подшипниках проскальзывание зависит не от аб-

солютных значений скоростей вращения внутреннего и наружного колец, а от разности их скоростей (от «скольжения роторов»).

Экспериментальные зависимости проскальзывания в подшипнике от разности скоростей вращения колец при нагрузке  $F_r=50$  Н и различных значениях радиального зазора приведены на рис. 8. Видно увеличение проскальзывания с увеличением «скольжения роторов».

Приведённые результаты экспериментов показали, что на всех режимах испытаний частота вращения сепаратора была выше эпициклической, рассчитанной без учёта сил трения в контактах и сопротивления вращению сепаратора.

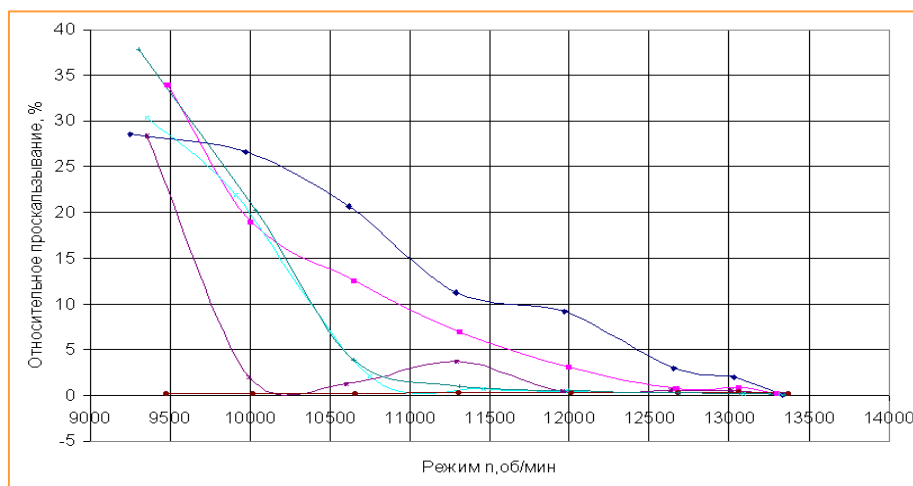


Рис.7. Зависимость проскальзывания комплекта роликов в подшипнике при  $F_r=50$  Н от частоты вращения и величины радиального зазора

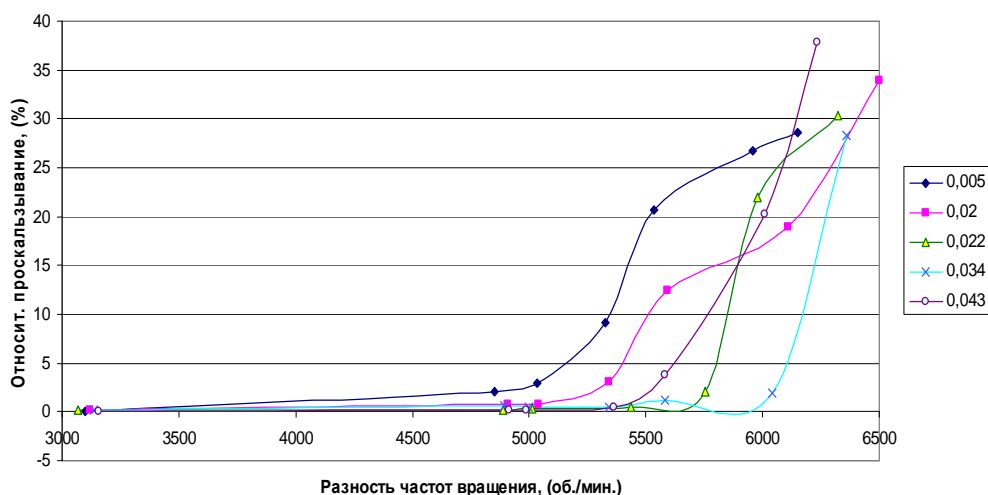


Рис.8. Зависимость проскальзывания комплекта роликов от разности частот вращения колец при различных значениях радиального зазора

На рис. 9 приведены результаты расчёта проскальзывания сепаратора на режимах испытаний при радиальном зазоре в сборе 0,043 мм и радиальной нагрузке 50 Н.

При выполнении расчётов температуры смазки принимались по экспериментальным данным. Для сравнения там же приведены экспериментальные значения проскальзывания комплекта роликов. Результаты расчётов имеют удовлетворительное соответствие с экспериментальными в связи с многофакторностью зависимости проскальзывания: от радиальной нагрузки, радиального зазора, как от скоростей вращения колец, так и от «скольжения» роторов, температуры не только наружного, но и внутреннего колец, температуры смазки, её свойств, объёма и способа подачи в подшипник и другое.

К сожалению, многие факторы сложно оценить и учесть в расчётах.

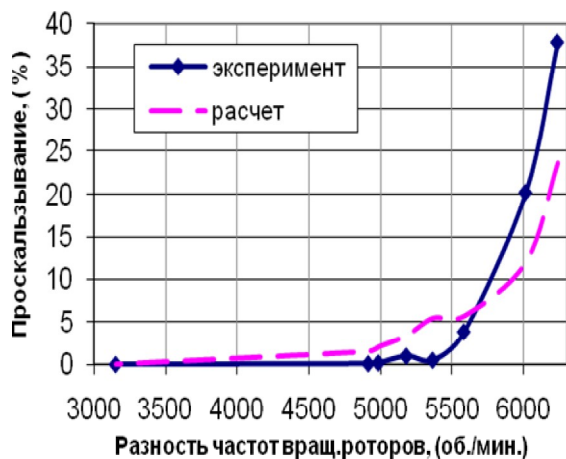


Рис. 9. Зависимость проскальзывания комплекта роликов от разности частот вращения колец при  $g = 43$  мкм и  $F_r = 50$  Н

Вместе с тем результаты экспериментов и теоретических расчётов позволяют сделать некоторые выводы о работоспособности межвальных подшипников.

Прежде всего, установлено, что термин «проскальзывание» для межвальных подшипников является условным, так как скорость вращения сепаратора оказывается не ниже, а выше теоретической (эпиклической). Это объясняется тем, что в

межвальном подшипнике большинство роликов (даже в разгруженной зоне) являются «ведущими», так как прижимаются значительными по величине центробежными силами к вращающемуся наружному кольцу. Теоретический анализ показывает, что вследствие этого скольжение роликов относительно наружного кольца минимально и близко к нулю. В то же время наблюдается значительное по величине скольжение роликов относительно внутреннего кольца.

Это говорит о высокой теплонапряженности в контактах роликов с внутренним кольцом и, как следствие, возможности значительного изнашивания и заедания.

Уменьшение скольжения сепаратора и изнашивания на внутреннем кольце может быть обеспечено не только подбором оптимальной величины радиального зазора, но и предварительным нагревом масла, подаваемого в подшипник.

### Библиографический список

1. Кузнецов, Н. Д. Обеспечение надёжности современных авиадвигателей [Текст] / Н. Д. Кузнецов // Проблемы надёжности и ресурса в машиностроении. – М.: Наука, 1986. – С. 51-68.
2. Акифьев, В. И. Разработка методики расчёта роликовых подшипников опор ГТД с учётом проскальзывания [Текст]: диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук. – Самара, Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, 1998. – 165 с.
3. Балякин, В. Б. Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД [Текст] / В. Б. Балякин, Е. П. Жильников, В. Н. Самсонов, В. В. Макаруч. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 254 с.
4. Макаруч, В. В. Разработка методов расчёта и проектирования высокоскоростных межвальных роликовых подшипников [Текст]: диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук. – Самара, Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, 2009. – 165 с.

5. Крагельский, И. В. Основы расчётов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М: Машиностроение, 1997. – 526 с.

6. Жильников, Е. П. Трение и изнашивание в узлах авиационной техники [Текст]: учеб. пособие / Е. П. Жильников, В. Н. Самсонов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 144 с.

7. Силаев, Б. М. Трибология деталей машин в маловязких смазочных средах [Текст]: монография / Б. М. Силаев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 264 с.

8. Исследование проскальзывания межвального подшипника 55 -2672919P5 изделия 99В: Технический отчёт / Руковод.: Г. М. Косинов, Н. И. Петров / ЦИАМ – Москва, 2002г. – 18 с.

## CALCULATION OF SKIDDING IN INTERSHAFT ROLLER BEARINGS OF GAS TURBINE ENGINES

© 2012 V. V. Makarchuk<sup>1</sup>, E. P. Zhilnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aviation Bearing Plant, Samara, Russia

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper describes methods and results of calculations of sliding in high-speed intershaft roller bearings. It presents the comparison of the results of experimental research in skidding of roller bearings on a test bench, imitating operating conditions of rolling bearings in supports of aircraft gas turbine engines, with calculations based on the computer model of an intershaft roller bearing.

*Roller bearing, sliding, wear.*

### Информация об авторах

**Макарчук Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, исполнительный директор дивизиона специальных подшипников, ОАО «Завод авиационных подшипников». Область научных интересов: авиационные подшипники.

**Жильников Евгений Петрович**, кандидат технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет) Область научных интересов: авиационные подшипники.

**Makarchuk Vladimir Vladimirovich**, candidate of technical science, chief executive of Special Bearings Division, Aviation Bearing Plant. Area of research: aircraft, bearings.

**Zhilnikov Evgeniy Petrovich**, candidate of technical science, professor, the department of machine design basics, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: aircraft bearings.

УДК 621.64

## МЕТОДИКИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБОПРОВОДОВ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

© 2012 Т. Б. Миронова, А. Б. Прокофьев, В. П. Шорин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Представлены методики конечно-элементного моделирования виброакустических характеристик трубопроводов при их нагружении пульсирующим потоком жидкости. Первая методика разработана для случая трубопровода с осевой линией, лежащей в одной плоскости, и основана на использовании семи-узловых конечных элементов. Методика моделирования трубопроводов сложной пространственной конфигурации с осевой линией, не лежащей в одной плоскости, предусматривает использование линейных конечных элементов. Разработанные методики программно реализованы и показали существенное снижение вычислительных затрат по сравнению с ранее известными. Проведена оценка сходимости результатов моделирования с экспериментальными данными.

*Трубопровод, виброакустические характеристики, пульсации рабочей жидкости, вибрация, конечный элемент, колебания, методика.*

Вибрация трубопроводов является фактором, оказывающим существенное влияние на надёжность, долговечность, производительность и другие параметры при эксплуатации энергетических и технологических установок и присоединённых механических систем. Её воздействие может вызвать целый ряд негативных последствий: разрушение самих трубопроводов, соединений трубопроводов с другими агрегатами, нарушение герметичности уплотнений и т.д. [1, 2]. Следует отметить, что аварии, связанные с разрушением трубопроводов энергетических и технологических установок, имеют тенденцию к росту и вызывают другие опасные последствия, например, пожары, аварийные разливы технологических, горючих, экологически опасных жидкостей [3]. Таким образом, необходимо проведение специальных исследований для решения задачи снижения вибрации трубопроводных систем.

Практика эксплуатации трубопроводных систем показывает, что причинами их вибрации часто являются пульсации давления и расхода, имеющие место

на выходе нагнетательных установок и затем передающиеся в систему, а также возмущения гидроударного характера, возникающие при включении и выключении нагнетательных установок, срабатывании запорных элементов и т.д. Несмотря на большое число исследований, посвящённых построению математических моделей трубопроводов, вибрирующих под действием пульсирующего потока рабочей жидкости, задача ещё далека от решения. Это обусловлено тем, что в ряде моделей принимаются идеализации, не в полной мере адекватные практике [4, 5], рассматриваются упрощённые формы геометрии осевой линии трубопровода [6, 7]. Известны и более детализированные модели [2, 8, 9], основным недостатком которых является чрезмерно высокая вычислительная трудоёмкость. В настоящей статье изложены модели, позволяющие достаточно подробно описать поведение трубопровода произвольной геометрии осевой линии при сравнительно невысокой вычислительной трудоёмкости.

Для решения задачи в качестве базовой была принята математическая модель,

описывающая виброакустические характеристики пространственно сложных (разветвленных) трубопроводных систем [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} &= \frac{\partial \bar{Q}'}{\partial \varepsilon} + \bar{q} + \bar{f} + \bar{\gamma}_1, \\ \frac{\partial p}{\partial \tau} &= -B_{mp} \frac{\partial w}{\partial \varepsilon}, \\ \bar{M} &= A(\bar{\chi} - \bar{\chi}_0) + \bar{M}_0, \\ \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial \tau} &= \bar{\omega} \times \bar{\chi}, \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varepsilon} &= \bar{e}_1 - \bar{e}_{10}, \\ \frac{\partial \bar{M}}{\partial \varepsilon} + \bar{e}_1 \times \bar{Q}'_0 + \bar{\mu} + \sum_{i=1}^m \bar{M}_{ci} \delta(\varepsilon - \varepsilon_i) &= 0, \\ \bar{f} &= f_1 \bar{e}_1 + f_2 \bar{e}_2 + f_3 \bar{e}_3, \\ n \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} + w \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau \partial \varepsilon} + \frac{\partial w}{\partial \tau} \left( \bar{e}_1 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varepsilon} \right)_2 \bar{e}_2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varepsilon} \right)_3 \bar{e}_3 \right) + w \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} \left( \bar{e}_1 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varepsilon} \right)_2 \bar{e}_2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varepsilon} \right)_3 \bar{e}_3 \right) \right) &= \\ &= - \frac{\partial(p \bar{e}_1)}{\partial \varepsilon} + \bar{\gamma}_2 - \bar{f}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $w_0$  и  $Dw$  – постоянная и пульсационная составляющие скорости жидкости, соответственно;  $p$  и  $Dp$  – постоянная и переменная составляющие давления, соответственно;  $e$  – координата, отсчитываемая вдоль линии центров тяжести сечения трубопровода от начала отсчёта до некоторого произвольного поперечного сечения;  $t$  – время;  $\bar{e}_1(e, t)$  – единичный вектор, направленный по касательной к осевой линии трубопровода;  $\bar{e}_2(e, t)$  – единичный вектор, направленный по нормали к осевой линии трубопровода;  $\bar{e}_3(e, t)$  – единичный вектор, направленный по бинормали к осевой линии трубопровода;  $u_i$  – виброперемещение в направлении  $\bar{e}_i(e, t)$ ;  $c$  – вектор кривизны пространственной осевой линии трубопровода.

Для рассмотренного в настоящей статье в качестве примера случая малых колебаний криволинейных трубопроводов с осевой линией, лежащей в одной плос-

кости, при их силовом нагружении пульсирующим потоком рабочей жидкости система дифференциальных уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{1}{\chi_3} \frac{\partial u_1}{\partial \varepsilon}, \\ \chi_{30}^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \frac{\partial^4 u_1}{\partial \varepsilon^2 \partial \tau^2} - nw \frac{\partial^4 u_1}{\partial \varepsilon^3 \partial \tau} - nw \chi_3^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varepsilon \partial \tau} - H \chi_3^2 \frac{\partial^5 u_1}{\partial \tau^4 \partial \varepsilon} &= \\ &= \frac{\partial^6 u_1}{\partial \varepsilon^6} + ((p + nw^2) + 2\chi_3^2) \frac{\partial^4 u_1}{\partial \varepsilon^4} + \\ &+ \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varepsilon^2} ((p + nw^2) + \chi_{30}^2) \chi_{30}^2 + nw \chi_{30}^2 \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} - n \chi_{30}^2 \frac{\partial w}{\partial \tau}, \\ \Phi_3 &= \frac{1}{\chi_3} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varepsilon^2} + \chi_3 u_1. \end{aligned} \tag{2}$$

В данной статье решение системы уравнений (2) реализуется с помощью метода конечных элементов, алгоритм применения которого для нестационарных задач и объектов, имеющих пространственную протяжённость, предусматривает использование методов частичной дискретизации и взвешенных невязок. Выбор базисных функций и количества узлов конечного элемента определяется порядком высшей производной по пространственной координате  $e$ , входящей в уравнение аппроксимации. В связи с этим выбран семиузловой пространственный конечный элемент. В качестве базисных функций выбран многочлен Лагранжа, обеспечивающий выполнение требования полноты системы базисных функций, позволяющий им с любой степенью точности аппроксимировать неизвестную функцию. Для получения точного решения базисные функции, входящие в аппроксимацию, имели шестой порядок (рис. 1). Введена локальная система координат элемента  $x$ , экстремальные значения узловых координат которой принимали значения -1 и 1 (рис.1), позволяющая проводить интегрирование по элементу в аппроксимирующем уравнении в стандартном аналитическом виде, что исключает пересчёт базисных функций.



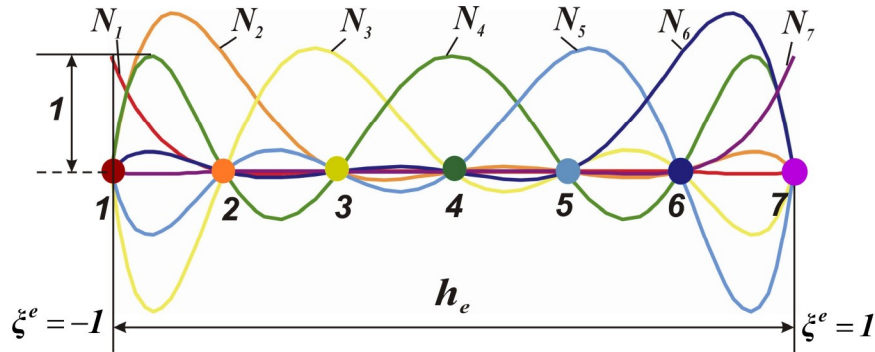


Рис. 1. Одномерный элемент и соответствующие лагранжевы базисные функции шестой степени

Получена система дифференциальных уравнений для пространственного семиузловой элемента в форме:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_k \mathbf{u}_l(0, t) + \mathbf{r} &= \mathbf{0}, & k = 1, 2, 3, \\ \mathbf{M}_k \mathbf{u}_l(l, t) + \mathbf{r} &= \mathbf{0}, & k = 4, 5, 6, \end{aligned} \quad (6)$$

$$[\mathbf{M}_{lm}^e] \times \left[ \frac{d^2(\mathbf{u}_l)_m}{d\tau^2} \right] + [\mathbf{C}_{lm}^e] \times \left[ \frac{d(\mathbf{u}_l)_m}{d\tau} \right] + [\mathbf{K}_{lm}^e] \times [(\mathbf{u}_l)_m] = [\mathbf{f}_l],$$

$$\mathbf{M}_{lm}^e = \int_{-1}^1 \left( \frac{2}{h^e} \frac{d^2 N_m}{d\xi^2} - \chi_{30}^2 \frac{h^e}{2} N_m \right) N_l d\xi,$$

$$\mathbf{C}_{lm}^e = \int_{-1}^1 n w \left( \left( \frac{2}{h^e} \right)^2 \frac{d^3 N_m}{d\xi^3} + \chi_{30}^2 \frac{dN_m}{d\xi} \right) N_l d\xi,$$

$$\mathbf{K}_{lm}^e = \int_{-1}^1 \left( \frac{2}{h^e} \right)^5 \frac{d^6 N_m}{d\xi^6} N_l d\xi + \int_{-1}^1 (2\chi_{30}^2 + p + n w^2) \left( \frac{2}{h^e} \right)^3 \frac{d^4 N_m}{d\xi^4} N_l d\xi +$$

$$\int_{-1}^1 ((\chi_{30}^2 + p + n w^2) \chi_{30}^2 \left( \frac{2}{h^e} \right)^2 \frac{d^2 N_m}{d\xi^2} N_l d\xi,$$

$$\mathbf{f}_l^e = \int_{-1}^1 n \chi_{30}^2 \left( \frac{\partial w}{\partial \tau} - w \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) \frac{h^e}{2} N_l d\xi$$

(3)

при  $0 < l, m < 7$ .

Ансамблированная система уравнений для  $\mathbf{M}$  элементов была получена суммированием компонент матриц элементов  $\mathbf{M}_{lm}^e, \mathbf{C}_{lm}^e, \mathbf{K}_{lm}^e$  и  $\mathbf{f}_l^e$  без учёта граничных условий. В векторной форме ансамблированное уравнение имеет вид

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{u}_l}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{u}_l}{dt} + \mathbf{K} \mathbf{u}_l = \mathbf{f}. \quad (4)$$

Учёт граничных условий проведён следующим образом. Аппроксимация

$$\mathbf{u}_l \gg \hat{\mathbf{u}}_l = \sum_{m=1}^{Mp+1} \hat{\mathbf{a}}_{lm}(\mathbf{u}_l) N_m(\xi) \quad (5)$$

подставлена в соотношения, описывающие краевые условия:

где  $\mathbf{M}_k$  - оператор дифференцирования, соответствующий заданному типу краевых условий;  $\mathbf{r}$  - постоянная величина, не зависящая от  $\mathbf{u}_l$ ;  $l$  - длина трубопровода.

В связи с тем, что выбранная система локальных базисных функций существует только в пределах соответствующего элемента, выражения, описывающие граничные условия, приведены к виду:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_k \hat{\mathbf{u}}_l(0, \tau) + \mathbf{r} &= \\ &= \mathbf{M}_k ((\mathbf{u}_l)_1(\tau) N_1(0) + (\mathbf{u}_l)_2(\tau) N_2(0) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_3(\tau) N_3(0) + (\mathbf{u}_l)_4(\tau) N_4(0) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_5(\tau) N_5(0) + (\mathbf{u}_l)_6(\tau) N_6(0) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_7(\tau) N_7(0)) + \mathbf{r} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$k = 1, 2, 3,$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_k \hat{\mathbf{u}}_l(l, \tau) + \mathbf{r} &= \\ &= \mathbf{M}_k ((\mathbf{u}_l)_{Ms-5}(\tau) N_1(l) + (\mathbf{u}_l)_{Ms-4}(\tau) N_2(l) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_{Ms-3}(\tau) N_3(l) + (\mathbf{u}_l)_{Ms-2}(\tau) N_4(l) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_{Ms-1}(\tau) N_5(l) + (\mathbf{u}_l)_{Ms}(\tau) N_6(l) + \\ &+ (\mathbf{u}_l)_{Ms+1}(\tau) N_7(l)) + \mathbf{r} = 0, \end{aligned}$$

$k = 4, 5, 6.$

Данные соотношения подставлены в ансамблированную систему уравнений (4) вместо трёх первых и трёх последних уравнений системы. Затем из выражений, описывающих граничные условия (7), выражены параметры  $(\mathbf{u}_l)_1, (\mathbf{u}_l)_2, (\mathbf{u}_l)_3, (\mathbf{u}_l)_{Ms-1}, (\mathbf{u}_l)_{Ms}$  и  $(\mathbf{u}_l)_{Ms+1}$  и также подставлены в систему уравнений (4). Учёт данных преобразований привёл к пересчёту коэффициентов приведённых матриц

для первого  $M_{lm}^{1e}$ ,  $C_{lm}^{1e}$ ,  $K_{lm}^{1e}$ ,  $f_l^{1e}$  и последнего элементов  $M_{lm}^{Me}$ ,  $C_{lm}^{Me}$ ,  $K_{lm}^{Me}$ ,  $f_l^{Me}$  в системе уравнений (4). Ансамблированная система уравнений с учётом преобразований записана в виде:

$$M\zeta \frac{d^2 u_1}{dt^2} + C\zeta \frac{du_1}{dt} + K\zeta u_1 = f\zeta \quad (8)$$

где  $M\zeta$ ,  $C\zeta$ ,  $K\zeta$ ,  $f\zeta$  - матрицы ансамблированной системы уравнений, полученные при учёте граничных условий.

Полученная ансамблированная система уравнений (8) с учётом граничных условий решена методом конечных элементов во временной области с помощью трёхслойной схемы интегрирования по времени:

$$\begin{aligned} & [M' + \gamma \Delta t_n C'^{n-1} + \beta \Delta t_n^2 K'^{n-1}] u_1^{2n+2} + \\ & + [-2M'^{n-1} + (1-2\gamma)\Delta t_n C'^{n-1}] u_1^{2n+1} + \\ & + [(1/2 - 2\beta + \gamma)\Delta t_n^2 K'^{n-1}] u_1^{2n+1} + \\ & + [M - (1-\gamma)\Delta t_n C'^{n-1}(\tau)] u_1^{2n} + \\ & + [(1/2 + \beta - \gamma)\Delta t_n^2 K'^{n-1}] u_1^{2n} = f'^n \Delta t_n^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{f}'^n &= \beta f'^{2n+2} + (1/2 - 2\beta + \gamma) f'^{2n+1} + \\ &+ (1/2 + \beta - \gamma) f'^{2n}, \end{aligned}$$

$n$  - номер узла во временной области.

Для начала вычислений по трёхслойной схеме исходные значения  $u^0$  и  $u^1$  определялись из начальных условий:

$$u(t=0) = u^0, \quad \frac{du}{dt}(t=0) = f(e). \quad (10)$$

Для определения параметра  $u_1^2$  на втором временном слое на первом этапе вычислений использовались стартовые конечно-разностные схемы. Значения весовых функций  $b = \frac{1}{4}$  и  $g = \frac{1}{2}$  были выбраны исходя из условий обеспечения безусловной устойчивости расчётной схемы и отсутствия искусственного числового затухания.

Представленная методика программно реализована с помощью языка

C++. Она позволяет проводить расчёты виброакустических характеристик трубопроводных систем со значительно меньшими, чем в известных работах [8, 9], вычислительными затратами. Однако описанная методика не применима для исследования разветвленных систем, осевая линия трубопроводов которых не лежит в одной плоскости. В связи с этим была разработана методика моделирования, основанная на использовании линейных конечных элементов. В данной статье её использование также продемонстрировано для случая трубопровода, осевая линия которого лежит в одной плоскости, что сделано для удобства сравнения результатов моделирования по обеим методикам. Однако описанные здесь подходы легко адаптируются и для трубопроводов, поведение которых описывается системой (1).

Для построения линейного конечно-го элемента, исходя из условий полноты системы базисных функций, второе уравнение системы (2), описывающей малые колебания пространственно криволинейных трубопроводов, с высшей частной производной по пространству шестого порядка преобразовано в систему шести уравнений с высшей производной по пространству первого порядка. Для этого введены следующие переменные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial \varepsilon} &= \varphi, \\ \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varepsilon^2} &= \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon} = q, \\ \frac{\partial^3 u_1}{\partial \varepsilon^3} &= \frac{\partial q}{\partial \varepsilon} = \theta, \\ \frac{\partial^4 u_1}{\partial \varepsilon^4} &= \frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} = \mu, \\ \frac{\partial^5 u_1}{\partial \varepsilon^5} &= \frac{\partial \mu}{\partial \varepsilon} = g. \end{aligned} \quad (11)$$

С учётом выражения (11) второе уравнение системы (2) примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\mathbb{1}g}{\mathbb{1}e} + (p + nw^2 + 2c_3^2)m + \\ & + nw \frac{\mathbb{1}q}{\mathbb{1}t} + \frac{\mathbb{1}^2 q}{\mathbb{1}t^2} + ((p + nw^2) + c_{30}^2)c_{30}^2 \times q + \\ & + nwc_3^2 \frac{\mathbb{1}j}{\mathbb{1}t} - c_{30}^2 \frac{\mathbb{1}^2 u_1}{\mathbb{1}t^2} = \\ & = nC_{30}^2 \frac{\mathbb{1}w}{\mathbb{1}t} - w \frac{\mathbb{1}w \ddot{0}}{\mathbb{1}e \ddot{0}} \end{aligned} \quad (12)$$

Краевые условия для механической подсистемы для системы дифференциальных уравнений (11), (12) имеют вид:

$$B(U) = \begin{pmatrix} \hat{e} B_1(U) \dot{u} \\ \hat{e} B_2(U) \dot{u} \\ \hat{e} \dots \dot{u} \\ \hat{e} B_6(U) \dot{u} \end{pmatrix} = \theta, \quad (13)$$

где  $B_k(U) = M_k u_1(0, t) + r, \quad k = 1, 2, 3;$

$$B_k(U) = M_k u_1(l, t) + r, \quad k = 4, 5, 6.$$

Выражения для начальных условий имеют вид:

$$\begin{aligned} U(t = 0) &= U^0, \\ \frac{dU}{dt}(t = 0) &= f(e). \end{aligned} \quad (14)$$

Неизвестная функция  $u_1$ , удовлетворяющая дифференциальным уравнениям (11), (12), представлена в виде  $U^T = (g_m, m_m, q_m, q_m, j_m, u_{1m})$ .

Тогда можно получить систему уравнений для пространственного элемента:

$$\begin{aligned} & \mu_m \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon - g_m \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = 0, \\ & \theta_m \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon - \mu_m \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = 0, \\ & q_m \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon - \theta_m \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = 0, \\ & \varphi_m \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon - q_m \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = 0, \\ & u_{1m} \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon - \varphi_m \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = 0, \\ & g_m \int_0^{h^e} \frac{\partial N_m}{\partial \varepsilon} N_1 d\varepsilon + \mu_m \int_0^{h^e} (p + nw^2 + 2\chi_{30}^2) N_m N_1 d\varepsilon + \\ & + \frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} \int_0^{h^e} nw N_m N_1 d\varepsilon + \frac{\partial^2 q_m}{\partial \tau^2} \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon + \\ & + q_m \int_0^{h^e} ((p + nw^2) + \chi_{30}^2) \chi_{30}^2 N_m N_1 d\varepsilon + \\ & + \frac{\partial \varphi_m}{\partial \tau} \int_0^{h^e} nw \chi_{30}^2 N_m N_1 d\varepsilon - \frac{\partial^2 u_{1m}}{\partial \tau^2} \int_0^{h^e} N_m N_1 d\varepsilon = \\ & = \int_0^{h^e} n \chi_{30}^2 \left( \frac{\partial w}{\partial \tau} - w \frac{\partial w}{\partial \varepsilon} \right) N_1 d\varepsilon. \end{aligned} \quad (15)$$

Для учёта граничных условий система уравнений (15) аппроксимирована с помощью метода частичной дискретизации. Из полученной системы уравнений определены значения искомой функции, её первая и вторая производные в граничных узлах пространственной области  $e = 0$  и  $e = 1$ :  $u_{11}, j_1, q_1, u_{1M_{p+1}}, j_{M_{p+1}}, q_{M_{p+1}}$ . Затем данные параметры подставлены в систему уравнений (15), описывающую общий пространственный элемент. Таким образом, получена система уравнений, описывающая граничные элементы. С помощью данной системы уравнений определены коэффициенты  $M_{lm}^I, C_{lm}^I, K_{lm}^I, f_l^I, M_{lm}^M, C_{lm}^M, K_{lm}^M$  и  $f_l^M$ .

Проведено ансамблирование для заданного числа элементов:

$$M \frac{d^2 U}{dt^2} + C \frac{dU}{dt} + KU = f, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} M &= \sum_{e=1}^E M_{lm}^e(\varepsilon), \\ C &= \sum_{e=1}^E C_{lm}^e(\tau, \varepsilon), \\ K &= \sum_{e=1}^E K_{lm}^e(\tau, \varepsilon), \\ f &= \sum_{e=1}^E f_l^e(\tau, \varepsilon). \end{aligned}$$

Выбор базисных функций и количества узлов конечного элемента определялся порядком высшей производной, входящей в уравнение аппроксимации. Для достижения требуемой точности в соответствии с требованием гладкости класс гладкости необходимых базисных функций должен быть  $C^0$ . В соответствии с данными условиями выбраны кусочно-линейные функции, которые для типичного пространственного конечного элемента имеют вид:

$$N_j = N_j^e = \frac{x}{h^e}, \quad N_i = N_i^e = \frac{h^e - x}{h^e}, \quad (17)$$

где  $x = e - e_i$  - нормированная локальная координата элемента,  $h^e = e_j - e_i$  - длина элемента.

Для решения полученной системы уравнений использовалась трёхслойная схема интегрирования по времени (9).

Ниже представлены результаты расчётов по разработанным методикам. На рис. 2 представлены временные реализации, полученные при моделировании виброакустических характеристик трубопровода по двум разработанным методикам при равном количестве узлов. Расхождение результатов моделирования составляет не более 3% по пиковым значениям.

Адекватность разработанных методик подтверждена сравнением результа-

тов экспериментальных исследований трубопровода при его нагружении пульсирующими потоком жидкости, расчёта данного трубопровода в Ansys и по предложенным методикам (рис. 3).

Можно сформулировать следующие выводы. Методика, основанная на использовании линейных конечных элементов, позволяет проводить моделирование разветвлённых систем, осевая линия трубопроводов которых не лежит в одной плоскости. Данная методика по сравнению с методикой, использующей семиузловые конечные элементы, при равном количестве элементов обладает меньшей точностью, однако является более простой с точки зрения алгоритма расчёта и менее трудоёмкой.

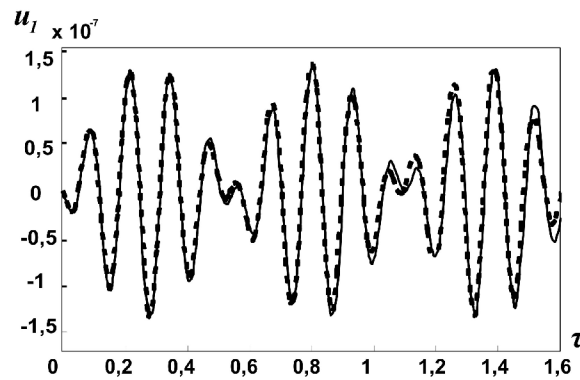


Рис.2. Расчетные временные реализации вибросмещения при колебаниях трубопровода:  
 –методика, использующая семиузловые конечные элементы;  
 ---методика использующая одномерные линейные конечные элементы

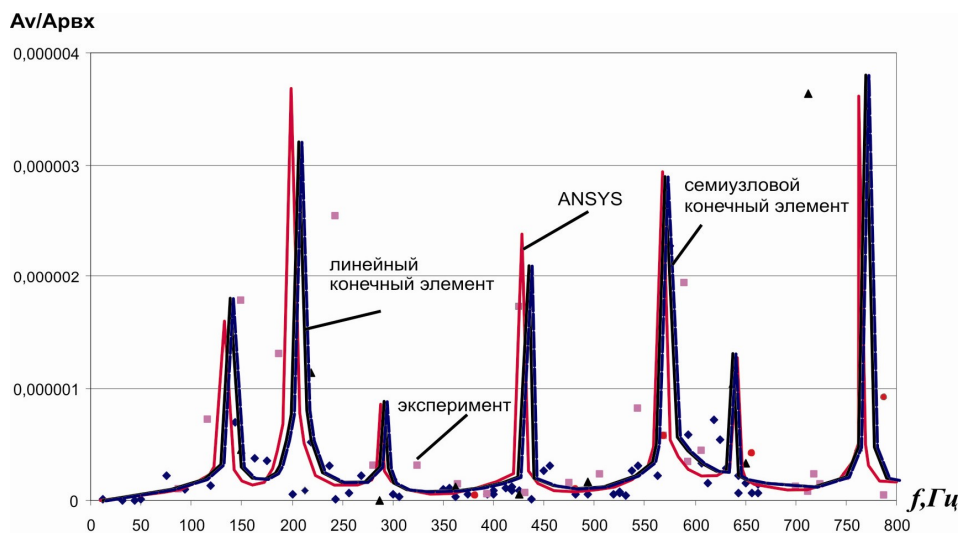


Рис.3. Амплитудная частотная характеристика трубопровода

Авторы ставят перед собой задачу внедрения разработанных конечных элементов в САЕ-систему Ansys. Это позволит обеспечить проведение связанных расчётов динамики присоединённых узлов и агрегатов, что является актуальным при построении виртуальных моделей летательных аппаратов и их двигателей. Следует отметить, что возможности такого внедрения ограничены, поскольку некоторые программные коды Ansys открыты только для служебного пользования.

### Библиографический список

1. Шорин, В. П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах [Текст]: / В. П. Шорин – М.: Машиностроение, 1980. – 156 с.
2. Моделирование виброакустических процессов в трубопроводных системах [Текст]: монография / А. Б. Прокофьев, Е. В. Шахматов – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – 168 с.
3. Вибрация трубопроводных систем энергетических установок как фактор экологического риска и подходы к ее снижению [Текст] / А. В. Васильев, О. В. Кипуров, Е. В. Васильев [и др.] // ELPIT 2011. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сб. тр. III Международного экологического конгресса (V Международ. науч.-техн. конф.). - Тольятти: ТГУ. - 2011. Т.6, Ч.1. – С. 99-104.
4. Кондрашов, Н. С. О параметрических колебаниях трубопроводов [Текст] / Н. С. Кондрашов // Вибрационная проч-

ность и надежность авиационных двигателей. Вып. XIX. Куйбышев. - 1965. – С. 173-181.

5. Гладких, П. А. Вибрации в трубопроводах и методы их устранения. [Текст]: П. А. Гладких, С. А. Хачатурян – М.: Машгиз, 1959. – 243 с.
6. Прокофьев, А. Б. Виброакустическая модель прямолинейного участка трубопроводной системы с гасителем колебаний в условиях силового возбуждения пульсациями рабочей жидкости [Текст] / А. Б. Прокофьев, Е. В. Шахматов // Ракетно-космическая техника. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем: науч.-техн. сб. Сер. XII. Вып. 1. – Самара: ВКБ РКК Энергия, 2000. – С. 120-131.
7. Pramila, A. Dynamic and stability of short fluid-conveying Timoshenko element pipes [Text] / A. Pramila, J. Laukkanen, S. Liukkonen // Journal of Sound and Vibration. 1991. – Vol.144. - P. 421-425.
8. Макарьянц, Г. М. Разработка методик расчета и исследование виброакустических характеристик трубопроводных систем [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: / Макарьянц Георгий Михайлович. – Самара, 2004. – 191 с.
9. Макарьянц, Г. М. Моделирование виброакустических характеристик трубопровода с использованием метода конечных элементов [Текст] / Г. М. Макарьянц, А. Б. Прокофьев, Е. В. Шахматов// Изв. СИЦ РАН. –2002. - Т.4, №2(8). – С. 327-323.

## FINITE ELEMENT TECHNIQUES FOR PIPE SYSTEM VIBROACOUSTICAL CHARACTERISTICS MODELLING

© 2012 T. B. Mironova, A. B. Prokofiev, V. P. Shorin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper presents techniques of finite-element modeling of pipeline vibroacoustic characteristics in case of pipelines being loaded with a pulsating fluid flow. The first technique is designed for a pipeline with the centre line lying in one plane and is based on using seven-node finite elements. The technique of modeling pipelines of a complex space configuration with the centre line not lying in one plane allows for the use of linear finite

elements. The techniques are realized in software and they mean considerable reduction of computational costs as compared to previously existing ones. The results of modeling are compared with the experimental data and their convergence is assessed.

*Pipeline, vibroacoustical characteristics, working fluid pulsations, finite element, fluctuation, technique.*

### **Информация об авторах**

**Миронова Татьяна Борисовна**, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [mirtb@rambler.ru](mailto:mirtb@rambler.ru). Область научных интересов: динамика трубопроводных систем, виброакустическое взаимодействие в элементах машин, активные методы подавления шума и вибрации элементов машин.

**Прокофьев Андрей Брониславович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Область научных интересов: динамика трубопроводных систем, виброакустика, расчёт и проектирование корректирующих устройств для гидромеханических систем, активные методы подавления шума и вибрации элементов машин.

**Шорин Владимир Павлович**, академик РАН, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [aseu@ssau.ru](mailto:aseu@ssau.ru). Область научных интересов: динамика пневмо- и гидросистем систем, виброакустика машин, расчёт и проектирование корректирующих устройств для гидромеханических и пневматических систем.

**Mironova Tatiana Borisovna**, candidate of technical sciences, assistant of the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [mirtb@rambler.ru](mailto:mirtb@rambler.ru). Area of research: dynamics of pipeline systems, vibroacoustics interaction of machine elements, active noise control.

**Prokofiev Andrei Bronislavovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Area of research: dynamics of pipeline systems, vibroacoustics, design of fluid pressure pulsation damper, active noise control.

**Shorin Vladimir Pavlovich**, member of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, professor of the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [aseu@ssau.ru](mailto:aseu@ssau.ru). Area of research: dynamics of hydraulic and pneumatic systems, design of fluid pressure pulsation damper, vibroacoustics of machines.

УДК 629.7.018.4.054

## ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

© 2012 В. Н. Николаев

ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина», г. Новосибирск

Разработан термоанемометрический преобразователь массовой скорости воздушного потока. Предложен метод оценивания динамической погрешности измерения на основе построения математических моделей нестационарного теплообмена преобразователя.

*Термоанемометрический преобразователь, массовая скорость, математическая модель, динамическая и статическая погрешности, нестационарный теплообмен.*

Определение тепловых условий работы бортового оборудования в отсеках летательных аппаратов требует результатов измерения вектора массовой скорости воздушного потока [1].

Массовая скорость воздушной среды в приборных отсеках из-за значительного изменения скорости и высоты полёта летательных аппаратов как по величине, так и, вероятно, по направлению носит нестационарный характер. Кроме того, на летательных аппаратах имеют место линейные перегрузки и виброускорения.

По совокупности предъявляемых требований к преобразователям вектора массовой скорости наиболее целесообразно использовать термоанемометрический метод постоянного тока [2, 3]. При использовании этого метода необходимо решить проблемы измерения нестационарных значений вектора массовой скорости при значительном изменении температуры, а также турбулентности воздушного потока. Преобразователи, описанные в работах [4 - 7], не позволяют измерять вектор массовой скорости при перечисленных условиях.

Известно, что интенсивность теплообмена тела, омываемого воздушным потоком, неравномерна по поверхности из-за различной толщины и характера движения воздуха в пограничном слое.

Для того, чтобы использовать это свойство тела при измерении вектора массовой скорости воздушного потока, необходимо найти оптимальную форму и размеры первичного преобразователя.

В качестве первичного преобразователя вектора скорости предлагается использовать центрально - симметричную выпуклую фигуру, идеал которой - сфера. К центрально-симметричным выпуклым фигурам относятся следующие: тетраэдр, куб, додекаэдр и так далее. Вид фигуры рационально выбирать из условия оптимизации разрешающей способности и трудоёмкости измерительного комплекса, то есть первичного и вторичного преобразователей, регистрирующего устройства и прочее. Если первичный преобразователь будет иметь малое количество граней, то трудоёмкость изготовления первичного преобразователя будет низкой, однако алгоритм определения направления перемещения воздуха будет сложен. И, наоборот, если первичный преобразователь будет иметь большое количество граней, то трудоёмкость изготовления заметно возрастает, а алгоритм упрощается. Поэтому был выбран додекаэдр (рис. 1), фигура с 12 гранями.

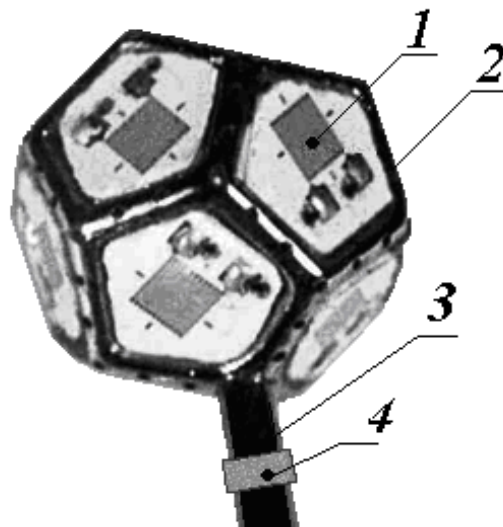


Рис. 1. Преобразователь вектора массовой скорости воздушного потока ДВС: 1 — чувствительные элементы термоанемометра; 2 — корпус; 3 — трубка для крепления преобразователя в заданной точке отсека; 4 — термометр на трубке

В отсеках летательных аппаратов может быть турбулентный характер перетекания воздуха. Отсюда грань первичного преобразователя должна воспринимать среднюю массовую скорость воздуха, а не её флуктуации. Для получения среднеинтегральной интенсивности теплообмена, характеризующейся определённым вектором массовой скорости воздушного потока, размеры чувствительных элементов, нанесённых на грани первичного преобразователя, должны быть больше микромасштаба турбулентности. С другой стороны, первичный преобразователь, введённый в воздушный поток, должен быть настолько мал, чтобы степень неравномерности поля измеряемой массовой скорости незначительно влияла на точность измерения, а вызываемое им возмущение картины течения было минимально. В зонах отрыва использовать преобразователь не предполагается.

Руководствуясь перечисленными требованиями, были выбраны размеры чувствительного элемента ( $4 * 5$  мм) и первичного преобразователя (диаметр описанной сферы додекаэдра 15 мм).

Первичный преобразователь вектора модуля массовой скорости воздушного потока (рис. 1) состоит из корпуса 1; чувствительных элементов термоанемометра 2, закреплённых на корпусе преобразователя; трубки 3, служащей для крепления преобразователя в заданной точке отсека, и термометра 4, закреплённого на трубке.

Измерение температуры воздушного потока необходимо для введения поправок на показания термоанемометрических чувствительных элементов при определении модуля массовой скорости.

Вторичный преобразователь вектора массовой скорости представляет собой источник постоянного тока и усилитель выходного сигнала первичного преобразователя.

Алгоритм определения вектора модуля массовой скорости следующий.

1. Получают градуировочную характеристику, то есть зависимость выходного сигнала с чувствительных элементов термоанемометра в вольтах от температуры воздушной среды  $T_{air}$  и модуля массовой скорости  $J_{air}$  (произведения скорости  $W_{air}$  и плотности воздушной среды  $\rho_{air}$ ) в виде таблиц (например, табл. 1).



Таблица 1. Выходной сигнал с чувствительных элементов преобразователя в зависимости от угла  $\alpha$  обтекания его воздушным потоком  $J_{air} = 2,46 \text{ кг}/(\text{м}^{2*} \text{ с})$  при  $T_{air} = 283 \text{ К}$

Угол $\alpha$ , рад	Грань											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	3,18	3,19	3,25	3,46	3,03	3,31	3,05	3,31	3,00	2,52	2,55	2,50
0,52	3,25	3,29	3,13	3,57	3,03	3,08	2,68	3,33	3,60	2,61	2,46	2,52
1,04	3,05	3,07	2,94	3,62	2,93	2,47	2,42	3,25	3,59	2,70	2,30	2,49
1,57	2,64	2,14	2,57	3,23	3,15	2,23	2,18	2,41	3,36	3,22	2,38	2,75
2,09	2,54	2,04	2,63	3,22	3,06	2,25	2,23	2,31	3,19	2,96	2,92	3,02
2,61	2,10	2,06	2,09	3,38	3,05	2,29	2,50	2,80	3,41	3,05	2,95	3,07
3,14	2,28	2,15	2,19	2,97	3,30	2,61	3,11	2,76	3,49	3,34	3,06	3,23
3,66	2,23	2,36	2,10	2,67	3,23	3,21	3,38	3,00	3,09	3,25	3,16	3,29
5,23	2,91	2,86	2,82	2,64	2,53	3,15	3,20	3,13	2,77	2,39	2,61	2,81
5,76	3,05	2,95	2,95	2,72	3,09	3,26	3,21	3,11	2,63	2,39	2,66	2,43

- Измеряют температуру воздушной среды.
- Определяют модуль массовой скорости по зависимости приведённого к количеству чувствительных элементов интегрального выходного сигнала со всех чувствительных элементов термоанемометра от модуля массовой скорости для измеренной температуры.
- Измеряют давление воздушной среды  $P_{air}$ .
- Рассчитывают плотность воздушной среды по формуле:  

$$\rho_{air} = 3,4852 \cdot 10^{-3} P_{air} / T_{air}, \quad (1)$$

где давление в паскалях, а температура в кельвинах.

- Если необходимо, то определяют модуль скорости воздушной среды по формуле:

$$W_{air} = J_{air} / \rho_{air}, \quad (2)$$

где массовая скорость в  $\text{кг}/(\text{м}^{2*} \text{ с})$ , а плотность в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Направление воздушной среды определяется двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$  в соответствии с номером (рис. 2) или совокупностью номеров чувствительных элементов (граней) с минимальными значениями выходного сигнала (табл. 2).

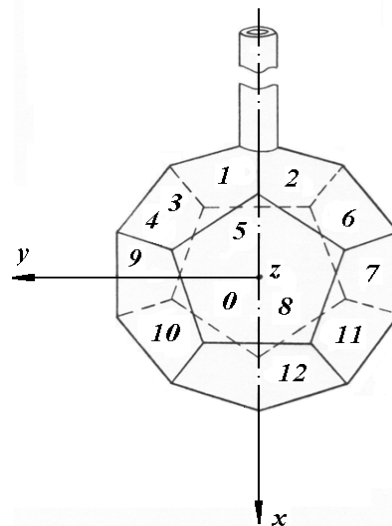


Рис. 2. Схема размещения чувствительных элементов на преобразователе вектора массовой скорости ДВС: 2, 3, 7, 8, 9, 12 — видимые грани; 1, 4, 5, 6, 10, 11 — невидимые грани

Таблица 2. Углы  $\alpha$  и  $\beta$  направления воздушного потока при номерах чувствительных элементов (граней) с минимальными значениями выходного сигнала

Грани	3,1,2	1,2,6	2,6,7	6,7,11	7,11,12	11,12,10	12,10,9	10,9,4
Угол $\alpha$ , рад	3,14	2,51	1,88	1,25	0,63	0	5,64	5,01
Угол $\beta$ , рад	3,14	0	0	0	0,52	0	0,52	0
Номер грани	9,4,3	4,3,1	3,2,8	2,7,8	7,12,8	12,9,8	9,3,8	4,1,5
Угол $\alpha$ , рад	4,38	3,76	3,14	1,88	0,63	5,64	4,38	2,51
Угол $\beta$ , рад	2,61	3,65	2,40	1,98	1,18	1,18	1,98	4,32
Номер грани	1,6,5	6,11,5	11,10,5	10,4,5	1	2	3	4
Угол $\alpha$ , рад	1,25	0	5,01	3,76	3,14	2,51	3,76	4,38
Угол $\beta$ , рад	4,32	5,22	5,56	5,22	3,76	0,70	0,70	3,76
Номер грани	5	6	7i	8	9	10	11	12
Угол $\alpha$ , рад	0	1,88	1,25	0	5,01	5,64	0,63	0
Угол $\beta$ , рад	4,70	3,76	0,70	1,57	0,70	3,76	3,76	0,70

Угол  $\alpha$  отсчитывается от оси X в плоскости XOY против часовой стрелки, угол  $\beta$  от оси X в плоскости XOZ также против часовой стрелки.

Погрешность определения направления в диапазоне от 0 до 6,28 ср определяли на основе результатов лабораторных исследований на стенде для моделирования воздушного потока переменной температуры и плотности. Температура и давление составляли соответственно  $T_{air} \approx 290$  К и  $P_{air} \approx 101 \cdot 10^5$  Па. Погрешность в зависимости от величины модуля массовой скорости в диапазоне 0,2 ... 50 кг / (м<sup>2</sup>·с) составляет 0,3 ... 0,6 ср.

Максимальные значения погрешности от вибрации, принятой по нормам для зоны приборных отсеков, при взаимно перпендикулярном направлении массовой скорости и виброскорости для массовой скорости  $J_w = 0,3$  кг / (м<sup>2</sup>·с), виброскорости  $J_f = 0,1$  кг / (м<sup>2</sup>·с) и частоте  $f_{sen} = 14$  Гц в диапазоне измерений массовой скорости 0,2 – 50 кг / (м<sup>2</sup>·с) равны 0,1 ... 0,001 ср. Погрешность модуля массовой скорости от вибрации при этих условиях не превышает  $\Delta J_f = 0,05$  кг / (м<sup>2</sup>·с).

Оценивание динамических и статических погрешностей измерения модуля проводилось на основе построения математических моделей нестационарного

конвективно - лучистого теплообмена преобразователя в отсеке летательного аппарата. Математическое моделирование позволяет найти изменение температуры термоанемометра от нестационарности конвективно-радиационного теплообмена, а также от количественных различий интенсивности теплообмена в реальных условиях и при тарировке термоанемометра. По найденным изменениям температуры определяют названные погрешности.

Математические модели термоанемометров соответственно для реальных условий и тарировки имеют следующий вид [8]:

$$\begin{aligned}
 & C_{sen} T'_{t, sen} + \alpha_{sen}(t) F_{sen} [T_{an} - T_{air}(t)] + \\
 & + c_0 \varepsilon_{sen, in, cv} F_{sen, in, cv} \left\{ \left[ \frac{T_{an}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{in, cv}(t)}{100} \right]^4 \right\} + \\
 & + c_0 \varepsilon_{sen, eq} F_{sen, eq} \left\{ \left[ \frac{T_{an}(t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{eq}(t)}{100} \right]^4 \right\} + \\
 & + I_{an}^2 R_{an}(t) = 0;
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{sen}(t) F_{sen} [T_{an, cl} - T_{air}] + \\
 & + c_0 \varepsilon_{cl} F_{cl} \left\{ \left[ \frac{T_{an, cl}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{cl}}{100} \right]^4 \right\} + I_{an}^2 R_{an} = 0,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где  $C_{sen}$  — теплоёмкость преобразователя;  $a_{sen}$  — коэффициент теплоотдачи преобразователя при конвективном теплообмене;  $F_{sen}$  — площадь теплоотдающей поверхности преобразователя при конвективном теплообмене;  $T_{an}$  — температура термоанемометров;  $c_0$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $e_{sen, in, cv}$  — приведённая степень черноты излучения преобразователя и внутренней поверхности обшивки;  $F_{sen, in, cv}$  — площадь взаимной поверхности излучения преобразователя и внутренней поверхности обшивки;  $T_{in, cv}$  — температура внутренней поверхности обшивки;  $e_{sen, eq}$  — приведённая степень черноты излучения преобразователя и окружающего преобразователь оборудования;  $F_{sen, eq}$  — площадь взаимной поверхности излучения преобразователя и окружающего преобразователь оборудования;  $T_{eq}$  — температура поверхности окружающего преобразователь оборудования;  $I_{an}$  — электрический ток, протекающий по чувствительным элементам;  $R_{an}$  — сопротивление чувствительных элементов;  $t$  — время;  $e_{cl}$  — приведённая степень чёрного излучения преобразователя при тарировке;  $F_{cl}$  — взаимная поверхность излучения преобразователя и окружающих поверхностей при тарировке;  $T_{an, cl}$  — температура термоанемометров при тарировке;  $T_{cl}$  — температура окружающих термоанемометры поверхностей при тарировке.

Уравнения (3), (4) при определённых упрощениях с учётом критериальных соотношений для коэффициентов теплоотдачи преобразователя  $a_{sen}$  можно привести к следующему виду:

$$T'_{t, sen} + \vartheta_1 J_{air}^{\vartheta_2}(t) [T_{an} - T_{air}(t)] + \vartheta_3 \left\{ \left[ \frac{T_{an}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{in, cv}(t)}{100} \right]^4 \right\} + \vartheta_4 \left\{ \left[ \frac{T_{an}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{eq}(t)}{100} \right]^4 \right\} + I_{an}^2 R_{an}(t) = 0; \quad (5)$$

$$\vartheta_1 J_{air}^{\vartheta_2}(t) [T_{an, cl} - T_{air}] + \vartheta_5 \left\{ \left[ \frac{T_{an, cl}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{cl}(t)}{100} \right]^4 \right\} + I_{an}^2 R_{an}(t) = 0; \quad (6)$$

где  $\vartheta_1, \vartheta_2, \mathbf{K}, \vartheta_5$  — параметры математической модели.

В общем виде уравнения (5), (6) можно записать следующим образом:

$$Y = F(Y, t, \Theta); \quad (7)$$

$$Y(0) = Y_0,$$

где  $\Theta = [\vartheta_1, \vartheta_2, \mathbf{K}, \vartheta_5]^T$  — вектор параметров модели.

Получение достоверных величин параметров модели расчётным путем не представляется возможным. Поэтому их оценивание проведём путём параметрической идентификации по данным лётных экспериментов и тарировки.

Для численного решения системы (7) используется метод Розенброка второго порядка аппроксимации, согласно которому вычисление решения на одном шаге численного интегрирования происходит следующим образом [9]:

$$Y_{n+1} = Y_n + a k_1 + (1+a) k_2; \quad (8)$$

$$(I - a h F_y(Y_n, t_n, \Theta)) k_1 = h F(Y_n, t_n + a h, \Theta); \quad (9)$$

$$(I + \alpha h F_y(Y_n, t_n, \Theta)) k_2 = h F(Y_n + \alpha k_1, t_n + 2\alpha h, \Theta); \quad (10)$$

$$a = 1 - 1/2^{0.5}, \quad (11)$$

где  $h$  — шаг интегрирования;  $I$  — единичная матрица;  $F_y$  — матрица Якоби системы (7).

Решение задачи оценивания параметров осуществляется путём минимизации суммы квадратов невязок между измеренными в ходе испытаний значениями температур и соответствующими значениями температур, полученными в ходе

расчёта по уравнениям модели. При этом используется алгоритм параметрической идентификации, являющийся композицией методов наискорейшего спуска, квазиньютоновского Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно и координатного.

Для вычисления градиента минимизируемой функции необходимо иметь производные от решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений по параметрам, которые называются функциями чувствительности. В программном обеспечении функции чувствительности вычисляются в результате од-

новременного решения системы (7) и системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая получается из неё в результате дифференцирования по параметрам и имеет вид:

$$Y_v(0) = F_y Y_v + F_v; \quad (12)$$

$$Y_v(0) = 0.$$

При этом используется экономичный алгоритм вычисления функции чувствительности, предложенный в работе [9].

Значения полученных параметров  $v$  приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры математической модели (5), (6)

Параметры модели	$J_1,$ $c^{-1}*(кг/м^2*c)^{-v2}$	$J_2$	$J_3,$ $К*м^2/Дж$	$J_4,$ $К*м^2/Дж$	$J_5,$ $К*м^2/Дж$
Значение параметров	0,62	0,42	$8,43*10^{-2}$	$8,61*10^{-2}$	$8,54*10^{-2}$

Расчётные погрешности оценок параметров модели при погрешности измерения расхода  $d = 3\%$  не превышают  $d_e = 5\%$ .

Динамическая и статическая погрешности определяются разностью значений температуры  $T_{an}$  термоанемометра в реальных условиях и при тарировке. Входящие в уравнения (3), (4) величины температур  $T_{cv}$ ,  $T_{air}$ ,  $T_{eq}$  и модуля массовой скорости  $J_{air}$  примем соответствующими

результатам лётного эксперимента летательного аппарата для режимов, пропорциональных режимам программ лётных ресурсных испытаний. Доверительные интервалы рассматриваемых погрешностей массовой скорости в диапазоне  $0,2 \dots 50 \text{ кг}/(\text{м}^2*\text{с})$  равны  $4*10^{-2} \text{ кг}/(\text{м}^2*\text{с})$  при доверительной вероятности 0,95.

Технические характеристики преобразователя ДВС даны в табл. 4

Таблица 4. Технические характеристики преобразователя вектора массовой скорости воздушной среды типа ДВС

Наименование технических характеристик преобразователя	Значения технических характеристик преобразователя
1	2
Диапазон измерений модуля массовой скорости воздушной среды при температуре $T_{air} = 230 - 390$ К и давлении $P_{air} = 1 \cdot 10^2 - 101 \cdot 10^3$ Па $J_w$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	0,3 – 20
Электрическое сопротивление чувствительных элементов, расположенных на гранях термоанемометра, при температуре $T_{an} = 273,15$ К $R_{an}$ , Ом	20±0,2
Температурный коэффициент электрического сопротивления термоанемометра $a_{an}$ , К <sup>-1</sup>	$4,23 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-4}$
Максимальная избыточная температура термоанемометра при температуре $T_{air} = 230 - 390$ К и давлении $P_{air} = 1 \cdot 10^2 - 101 \cdot 10^3$ Па $\Delta T_{an}$ , К	80
Максимальное значение электрического тока разогрева термоанемометра $I_{an}$ , А	$5,5 \cdot 10^{-2}$
Основная относительная погрешность термоанемометра модуля $ d_{an} $ и вектора $d_{an}$ , %	15; 10
Дополнительная относительная погрешность от влияния вибрации $d_f$ , %	2
Показатель тепловой инерции термоанемометра при его описании динамическим аperiодическим звеном первого порядка в используемом диапазоне массовой скорости $e_{an}$ , с	$2,3 J_w^{-0,5}$
Диапазон измерений температуры воздушного потока $T_{air}$ , К	230 – 390
Электрическое сопротивление термометра при температуре $T_T = 273,15$ К $R_T$ , Ом	50±2
Температурный коэффициент электрического сопротивления термометра $a_T$ , К <sup>-1</sup>	$4,23 \cdot 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Основная относительная погрешность термометра $d_T$ , %	$6 \cdot 10^{-1}$
Показатель тепловой инерции термометра при его описании динамическим аperiодическим звеном первого порядка в используемом диапазоне массовой скорости $e_T$ , с	$2,3 J_w^{-0,5}$
Максимальная степень неравномерности поля измеряемой массовой скорости $\Delta J_w / J_w$ , %	5
Максимальная степень неравномерности поля температуры воздушного потока $\Delta T_{air} / T_{air}$ , %	5

Разработанный преобразователь вектора массовой скорости был использован при определении тепловых условий работы бортового оборудования в негерметизированном продуваемом теплоизолированном отсеке (рис. 3). Расход воздуха, выходящего из системы обеспечения теплового режима, был принят  $G_{stm} =$

0,5 – 1 кг/с, температура  $T_{stm} = 283,15 – 293,15$  К. Разница между измеренным преобразователем (рис. 4) и рассчитанным модулем массовой скорости не превышала 15% от измеренного значения, разница по температуре находилась в пределах 5 К.

$$\rho_V, V_{air,out}, T_{air,out}$$

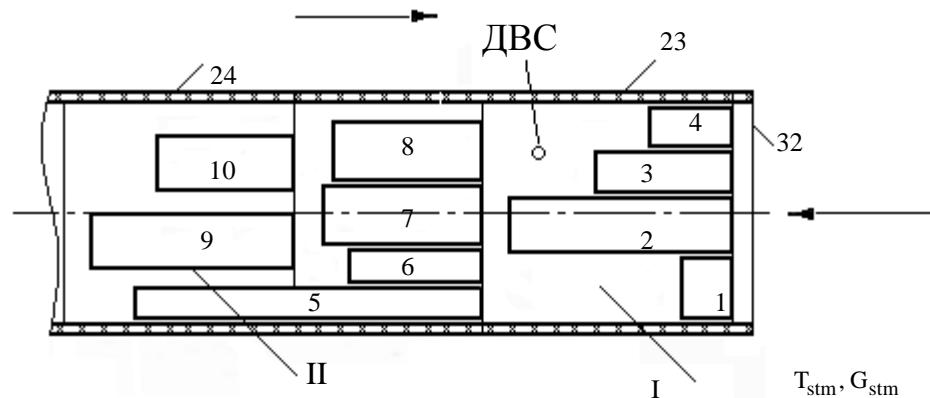


Рис. 3. Фрагмент негерметизированного продуваемого теплоизолированного отсека: I - II — части отсека; 1 - 10 — блоки бортового оборудования; 23, 24, 32 — части обшивки; ДВС — преобразователь вектора массовой скорости воздушного потока;  $\rho_V$  — плотность воздушной среды за бортом;  $V_{air,out}$  — воздушная скорость полёта;  $T_{air,out}$  — температура воздушной среды за бортом;  $T_{stm}$  — температура воздуха на выходе системы обеспечения теплового режима;  $G_{stm}$  — расход воздуха на выходе системы обеспечения теплового режима

$$J_W, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

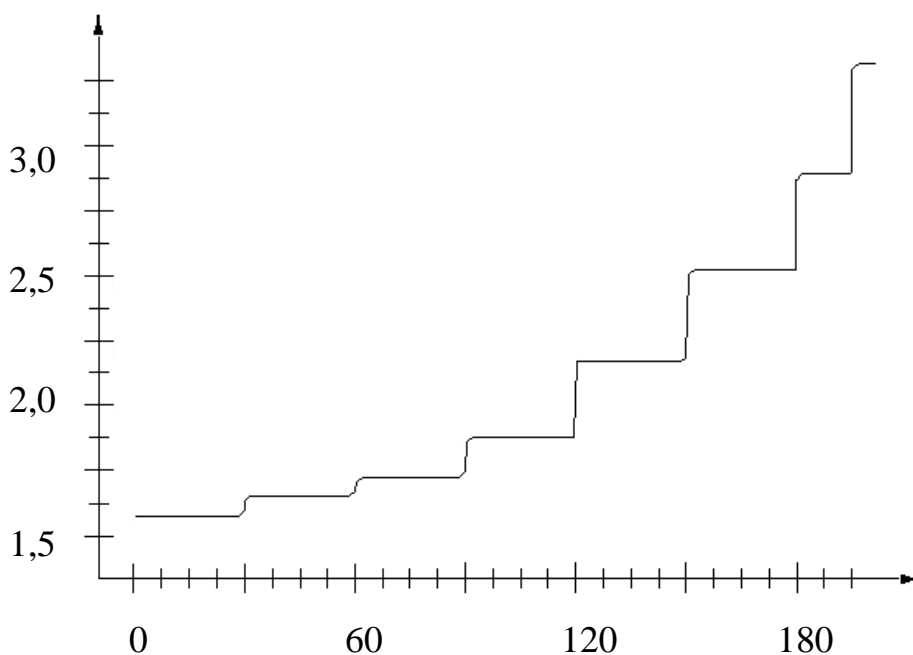


Рис. 4. Измеренные значения массовой скорости воздушной среды

Таким образом, разработан термоанемометрический преобразователь массовой скорости воздушного потока в форме додекаэдра. Предложен метод оценивания динамической погрешности измерения и исследованы методические погрешности измерения.

#### Библиографический список

1. Дульнев, Г. Н. Методы расчёта тепловых режимов прибора [Текст] / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфёнов, А. В. Сагалов - М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
2. Горлин, О. М. Экспериментальная аэромеханика [Текст]/ О. М. Горлин - М.: Высшая школа, 1970. - 423 с.
3. Качурин, Л. Г. Электрическое измерение аэродинамических величин [Текст]/ Л. Г. Качурин - М.: Высшая школа, 1967. - 488 с.
4. Хинце, И. О. Турбулентность, ее механизм и теория. Пер. с англ [Текст] / И. О. Хинце. - М.: Физматгиз, 1963. - 680 с.
5. Кивилис, С. С. Новая аппаратура для измерения расхода веществ [Текст] /С. С. Кивилис // Итоги науки и техники. Метрология и измерительная техника. - 1976. - № 3. - С. 152-158.
6. Kim Seun., Kim Sun., Kim Y., Park S. A circular-type thermal flow direction sensor with an integrated interface circuit // International Journal Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. -№ 3 - 4. - P. 289 – 294.
7. Nguyen N.-T. A novel thermal sensor concept for flow velocity // IEEE Sensor Journal. – 2005. -№ 6. - P. 1224 – 1234.
8. Николаев, В. Н. Экспериментально – теоретический метод определения параметров теплообмена бортового оборудования самолета – истребителя. Алгоритмическое и программное обеспечение исследований внешних воздействий на бортовое оборудование самолётов и вертолетов [Текст] / В. Н. Николаев // Научно–технический сборник. – Новосибирск: СибНИА. – 1989. – Вып. 4. – С. 17 – 26.
9. Гусев, С. А. Алгоритм идентификации параметров жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / С. А. Гусев, Г. В. Демидов. - Новосибирск, 1983. – 17 с. – (Препринт/ АН СССР, Сиб. отд – ние, ВЦ; 484).

## A HOT-WIRE ANEMOMETRIC TRANSDUCER OF AIRFLOW MASS RATE

© 2012 V. N. Nikolayev

FSUE “S. A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute”

A hot-wire anemometric mass airflow rate transducer is developed. A method of assessing dynamic measurement error on the basis of constructing mathematical models of the transducer’s unsteady heat exchange is proposed.

*Hot-wire anemometric transducer, mass rate, mathematical model, dynamic and static errors, unsteady heat exchange.*

#### Информация об авторе

**Николаев Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, начальник сектора ФГУП «Сибирского научно – исследовательского института авиации им. С. А. Чаплыгина». E-mail: [nikvla50@mail.ru](mailto:nikvla50@mail.ru). Область научных интересов: математическое моделирование теплового состояния отсеков и систем самолёта при проектировании, лётных испытаниях и математическое моделирование электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования самолёта.

**Vladimir Nikolayevich Nikolayev**, PhD in technical sciences, head of a sector at FSUE “S. A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute”. E-mail: [nikvla50@mail.ru](mailto:nikvla50@mail.ru). Area of research: mathematical simulation of aircraft bays’ and systems’ thermal state during development work and flight tests, mathematical simulation of electromagnetic compatibility of aircraft radioelectronic equipment.



УДК 539.374.519.8

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН ИЗ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 Ю. С. Первушин, П. В. Соловьёв

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассматривается влияние несбалансированности структуры многослойных композиционных материалов, вызванной отклонениями углов укладки слоёв и нарушением последовательности их укладки, на напряжённое состояние и деформационное поведение слоистых пластин при изгибе.

Влияние несбалансированности при изгибе исследуется на двухопорных и защемлённых пластинах прямоугольного поперечного сечения, находящихся под действием распределённой по поверхности нагрузки, при разных числах слоёв.

Приведены результаты влияния несбалансированности на деформированное и напряжённое состояние многослойных пластин.

*Композит, слой, несбалансированность, напряжение, деформация, пластина, анизотропия, ортотропия.*

В большинстве случаев слоистые композиты имеют так называемую сбалансированную структуру.

Под *сбалансированной* понимается структура слоистого композита, отвечающая следующим требованиям:

- симметрии слоёв с одинаковыми физико-механическими характеристиками относительно срединной поверхности слоистого пакета;

- каждому слою с углом укладки  $+\varphi$  должен соответствовать слой с углом  $-\varphi$ , расположенный на одинаковом расстоянии от срединной поверхности.

Практически удовлетворить вышеуказанным требованиям сбалансированности невозможно. Удовлетворение требованию симметричности исключает удовлетворение второму условию. Поэтому уже на этапе проектирования большинство структур являются несбалансированными.

Несбалансированность возникает и вследствие технологических факторов на этапе изготовления. К таким факторам относятся:

- отклонения углов укладки слоёв от заданных;
- нарушение установленной последовательности укладки слоёв;

довательности укладки слоёв;

- наличие разнотолщинности укладываемых слоёв.

Неучёт этих факторов приводит к асимметрии упругих свойств и непрогнозируемому напряжённому состоянию и деформационному поведению.

### Модель деформирования несбалансированных многослойных композитов

Техническая теория изгиба анизотропных пластин обычно строится на следующих гипотезах [1]:

1. Кинематической гипотезе, называемой гипотезой прямолинейного элемента.

2. Статической гипотезе, на основании которой на площадках, параллельных срединной плоскости, пренебрегают нормальными напряжениями  $\sigma_z$ , возникающими вследствие нажатия горизонтальных слоёв пластинки друг на друга.

Рассмотрим ортотропную пластину в прямоугольной декартовой системе координат  $OXYZ$ . Считаем, что её срединная плоскость, одновременно являясь плоскостью упругой симметрии, совпадает с плоскостью  $XOY$ , а плоскости  $XOZ$  и  $YOZ$  параллельны двум другим плоско-

стям упругой симметрии. Толщина пластины –  $h$ , стороны –  $a$  и  $b$ . Их соотношение обозначим через  $c = a/b$ .

Граничными условиями для случая двухопорного закрепления пластины будут следующие (рис. 1) [1]:

при  $x=0, x=a: w=0, M_x=0;$

при

$y=0, y=b: T_y=0, N_y=0,$

$M_y=0, S_{xy}=0.$

Для защемлённого края граничные условия таковы:

при

$x=0, x=a:$

$u=0, v=0, w=0, \varphi_x = \frac{dw}{dx} = 0;$

при

$y=0, y=b:$

$u=0, v=0, w=0, \varphi_y = \frac{dw}{dy} = 0.$

Здесь  $\varphi_x, \varphi_y$  – углы поворота относительно соответствующих осей.

Схема поперечного сечения слоистой пластины с произвольным числом слоёв представлена на рис. 2.

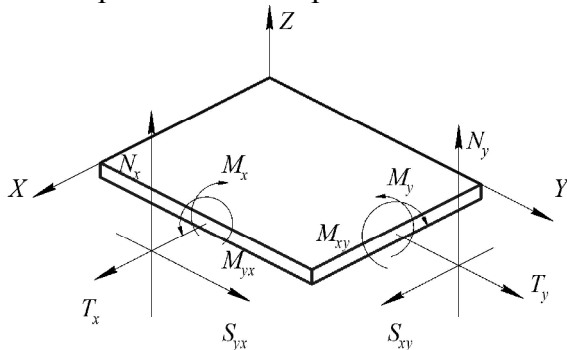


Рис. 1. К составлению граничных условий на контуре пластинки

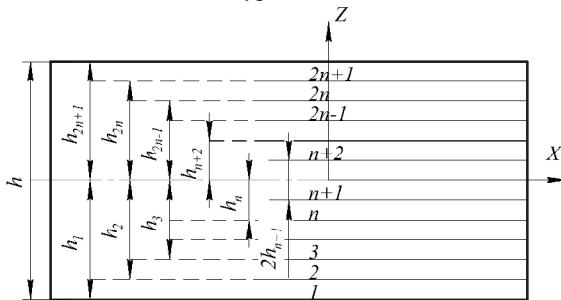


Рис. 2. Схема поперечного сечения слоистой пластины

В общем виде дифференциальное уравнение изогнутой поверхности ортотропной пластины при действии на неё распределённой нагрузки  $q$  имеет вид [1]:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q. \tag{1}$$

Для ортотропной пластинки в основных осях уравнение прогибов имеет вид [1]:

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q, \tag{2}$$

где

$D_{11} = D_1; D_{22} = D_2; D_{16} = D_{26} = 0;$

$D_{66} = D_k; D_3 = D_{12} + 2D_{66}.$

Жёсткости  $D_1, D_2, D_3, D_{12}$  и  $D_k$  для слоистой ортотропной пластины определяются по формулам [2]:

$$D_1 = \frac{2}{3} \left[ \frac{E_x^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_x^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right],$$

$$D_2 = \frac{2}{3} \left[ \frac{E_y^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right],$$

$$D_k = \frac{2}{3} \left[ \frac{G_{xy}^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{G_{xy}^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right],$$

$$\nu_{12} = \frac{2}{3D_2} \left[ \frac{E_y^{n+1} \nu_{xy}^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_{xy}^{n+1} \nu_{yx}^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_y^m \nu_{xy}^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right], \tag{3}$$

$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{D_2}{D_1}; D_{12} = D_1 \nu_{21};$

$D_3 = D_1 \nu_{21} + 2D_k.$

Здесь  $E_x^m, E_y^m, G_{xy}^m$  – модули Юнга в на-

правлении главных осей упругой симметрии многослойной пластины  $OX$  и  $OY$  и модуль сдвига в плоскости  $XOY$  для слоя с номером  $m$ ;  $\nu_{xy}^m, \nu_{yx}^m$  – коэффициенты Пуассона  $m$ -го слоя (первый индекс обозначает направление действия силы, второй – направление поперечной деформации).

Главные оси упругости пластины  $OX$  и  $OY$  совпадают с главными осями упругости срединного слоя (слой  $n+1$ , рис. 2). Для срединного слоя справедливы выражения:

$$E_x^{n+1} = E_1, E_y^{n+1} = E_2, G_{xy}^{n+1} = G_{12},$$

$$\nu_{xy}^{n+1} = \nu_{12}, \nu_{yx}^{n+1} = \nu_{21}.$$

Здесь  $E_1, E_2$  – модули упругости однонаправленного слоя в продольном и поперечном направлениях;  $G_{12}$  – модуль внутрислойного сдвига однонаправленного слоя;  $\nu_{12}, \nu_{21}$  – коэффициенты Пуассона однонаправленного слоя. Для остальных слоёв характеристики  $E_x^m, E_y^m, G_{xy}^m, \nu_{xy}^m, \nu_{yx}^m$  вычисляются следующим образом [3]:

$$E_x^m = \left( \frac{\cos^4 \varphi_m}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin^2 \varphi_m \cos^2 \varphi_m + \frac{\sin^4 \varphi_m}{E_2} \right)^{-1},$$

$$E_y^m = \left( \frac{\sin^4 \varphi_m}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin^2 \varphi_m \cos^2 \varphi_m + \frac{\cos^4 \varphi_m}{E_2} \right)^{-1},$$

$$\nu_{xy}^m = E_x \cdot \left( \frac{\nu_{12}}{E_1} \cdot (\sin^4 \varphi_m + \cos^4 \varphi_m) - \right. \\ \left. - \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] \cdot \sin^2 \varphi_m \cos^2 \varphi_m \right),$$

$$G_{xy}^m = \left[ \left( \frac{1+\nu_{12}}{E_1} + \frac{1+\nu_{21}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin^2 2\varphi_m + \frac{1}{G_{12}} \right]^{-1}, \nu_{yx}^m = \nu_{xy}^m \cdot \frac{E_y^m}{E_x^m}. \quad (4)$$

Здесь  $\varphi_m$  – угол укладки слоя с номером  $m$ .

Решение уравнения (2) целесообразно искать в виде суммы [1]:

$$w = w_1(x, y) + w_0(y), \quad (5)$$

где

$$w_1 = \sum_{n=0}^{\infty} x_n(x) \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad (6)$$

$$w_0 = \frac{b^4}{D_2 \pi^4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n^4} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (7)$$

Здесь  $a_n$  – коэффициенты разложения в ряд нагрузки  $q(y)$ . Эти коэффициенты выражаются по формуле [1]:

$$a_n = \frac{2}{b} \int_0^b q \sin \frac{n\pi y}{b} dy. \quad (8)$$

Функция для прогибов представляется в виде [1]:

$$w = w_0(y) + \frac{b^4}{D_2 \pi^4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n^4} \times \\ \times \frac{s_2 \operatorname{sh} \frac{n\pi s_2 c}{2} \operatorname{ch} \frac{n\pi s_1 x}{b} - s_1 \operatorname{sh} \frac{n\pi s_1 c}{2} \operatorname{ch} \frac{n\pi s_2 x}{b}}{s_1 \operatorname{sh} \frac{n\pi s_1 c}{2} \operatorname{ch} \frac{n\pi s_2 c}{2} - s_2 \operatorname{sh} \frac{n\pi s_2 c}{2} \operatorname{ch} \frac{n\pi s_1 c}{2}} \times \\ \times \sin \frac{n\pi y}{2}. \quad (9)$$

Здесь

$$s_1 = \pm \sqrt{\frac{D_3}{D_1} + \sqrt{\left(\frac{D_3}{D_1}\right)^2 - D_2}};$$

$$s_2 = \pm \sqrt{\frac{D_3}{D_1} - \sqrt{\left(\frac{D_3}{D_1}\right)^2 - D_2}}. \quad (10)$$

Составляющие напряжения в слое  $m$  определяются по формулам [2]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^m &= z \frac{E_x^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_{yx}^m \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ \sigma_y^m &= z \frac{E_y^m}{1 - \nu_{xy}^m \nu_{yx}^m} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_{xy}^m \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\ \tau_{xy}^m &= z \cdot 2G_{xy}^m \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\}$$

## Влияние несбалансированности на напряжённое состояние и деформационное поведение многослойных пластин

Рассмотрим влияние несбалансированности на напряжённое состояние и деформационное поведение двухопорной и защемлённой пластин из слоистого углепластика на примере пятислойной пластины (рис. 3, 4).

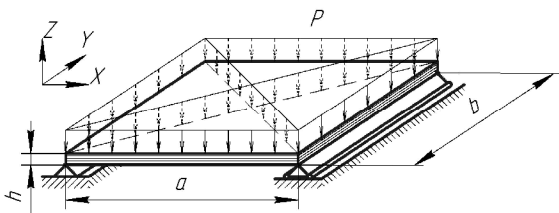


Рис. 3. Расчётная схема двухопорной слоистой композитной пластины

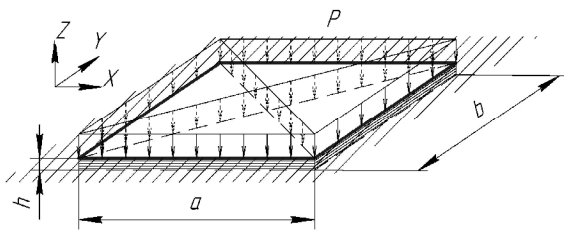


Рис. 4. Расчётная схема защемлённой слоистой композитной пластины

### Исходные данные:

толщина слоя  $h_c = 0,25$  мм; количество слоёв  $n = 5$ ;

толщина слоистого пакета  $h = h_c \cdot n = 0,25 \cdot 5 = 1,25$  мм;

длина пластины  $a = l = 250$  мм; ширина пластины  $b = 250$  мм;

распределённая по поверхности нагрузка  $P = 1000$  Па;

материалом однонаправленного слоя служит углепластик на основе эпоксидной матрицы с коэффициентом армирования  $\psi = 0,7$ .

Характеристики армирующего материала (углеродные волокна):

$$E_{e1} = 300 \text{ ГПа}; \quad E_{e2} = 9 \text{ ГПа}; \\ G_{e12} = 12 \text{ ГПа}; \quad \nu_{e12} = 0,15.$$

Здесь  $E_{e1}$  – продольный модуль упругости волокна,  $E_{e2}$  – поперечный модуль упругости волокна,  $G_{e12}$  – модуль сдвига волокна,  $\nu_{e12}$  – продольно-поперечный коэффициент Пуассона волокна (1 – направление нагружения, 2 – направление поперечной деформации).

Характеристики матрицы (эпоксидная смола):

$$E_m = 4,0 \text{ ГПа}; \quad G_m = 1,0 \text{ ГПа}; \\ \nu_m = 0,35.$$

Здесь  $E_m, G_m, \nu_m$  – модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона матричного материала соответственно.

### Отклонение углов укладки

Изначально пластина имеет следующую сбалансированную схему укладки слоёв по толщине:  $(45 / -45 / 0 / -45 / 45)^0$ . Далее угол укладки внешнего слоя (слой №5) изменяется на  $\pm 3^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$  и анализируется напряжённо-деформированное состояние пластины.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния пятислойной пластины выполнялся с использованием программного продукта ANSYS. Необходимыми для расчёта в ANSYS исходными данными являются девять упругих характеристик элементарного слоя:  $E_1, E_2, E_3$  – модули упругости однонаправленного слоя в направлениях главных осей упругой симметрии слоя 1, 2 и 3, соответственно;  $G_{12}, G_{23}, G_{13}$  – модули сдвига в плоскостях 12, 23, 13, соответственно;  $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$  – коэффициенты Пуассона.

Упругие характеристики однонаправленного слоя, рассчитываемые по методу [3], следующие:  $E_1 = 211$  ГПа;  $E_2 = 6,55$  ГПа;  $G_{12} = 2,79$  ГПа;  $\nu_{12} = 0,21$ . Оставшиеся характеристики, влияющие на расчёт незначительно, приняты следующими:  $E_3 = 4$  ГПа;  $G_{23} = G_{13} = 1$  ГПа;  $\nu_{23} = \nu_{13} = 0,01$ .

Рассчитанные по формулам (3) изгибные и крутильные жёсткости составляют:

$$D_1 = 14,4 \text{ Па}\times\text{м}^3; \quad D_2 = 7,8 \text{ Па}\times\text{м}^3;$$

$$D_k = D_{66} = 7,1 \text{ Па}\times\text{м}^3;$$

$$D_{12} = D_1\nu_{12} = 6,9 \text{ Па}\times\text{м}^3;$$

$$D_3 = D_1\nu_{12} + 2D_k = 21,1 \text{ Па}\times\text{м}^3.$$

Зависимость прогибов пятислойных пластин из углепластика (защемлённой и двухопорной) от величины отклонения углов укладки внешнего слоя выглядит следующим образом (рис. 5).

Характер изменения нормальных напряжений вдоль волокон в крайних слоях наиболее напряжённых сечений пластин представлен на рис. 6, 7. Напряжения вычислялись в каждом слое в их локальных системах координат.

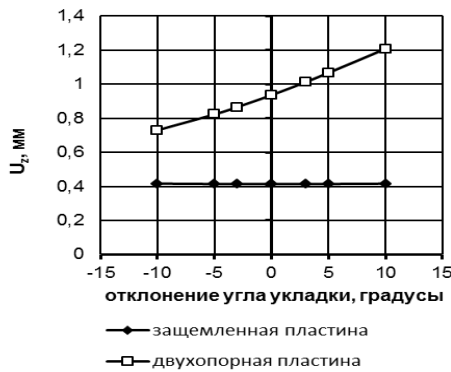


Рис. 5. Зависимость прогибов пятислойных пластин из углепластика от величины отклонения углов укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния ( $45^\circ$ )

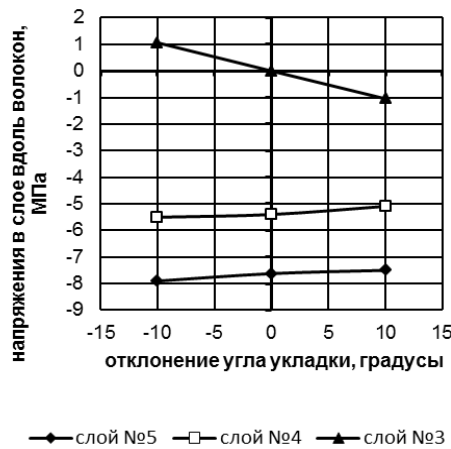


Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пятислойной защемлённой пластины из углепластика от отклонения угла укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния ( $45^\circ$ )

Для выявления влияния числа слоёв на величину изменения прогибов были рассмотрены двухопорные и защемлённые пластины, у которых количество слоёв составляло девять, тринадцать и семнадцать. Для этих пластин графики зависимостей прогибов и нормальных напряжений вдоль волокон не приводятся, так как они качественно схожи с графиками, приведёнными выше для пятислойных углепластиковых пластин.

На рис. 8 приведена зависимость максимального относительного изменения прогиба несбалансированных пластин по отношению к сбалансированным структурам.

При числе слоёв более пяти сбалансированные структуры укладки слоёв следующие:

- 9-слойная пластина —  $(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / -45 / 45)^0$ ;
- 13-слойная пластина —  $(45 / -45 / 30 / -30 / 45 / -45 / 0 / -45 / 45 / -30 / 30 / -45 / 45)^0$ ;
- 17-слойная пластина —  $(45 / -45 / 30 / -30 / 45 / -45 / 15 / -15 / 0 / -15 / 15 / -45 / 45 / -30 / 30 / -45 / 45)^0$ .

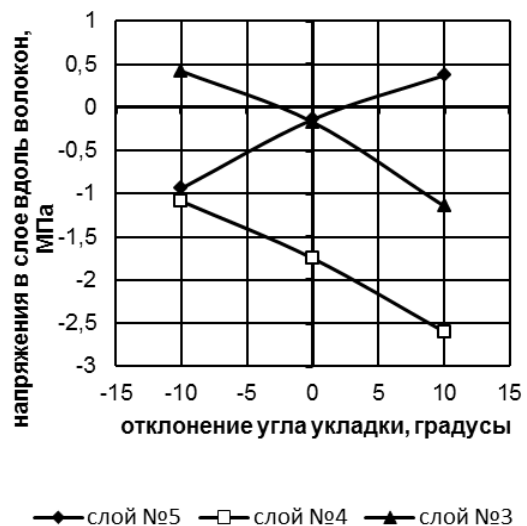


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пятислойной двухопорной пластины из углепластика от отклонения угла укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния ( $45^\circ$ )

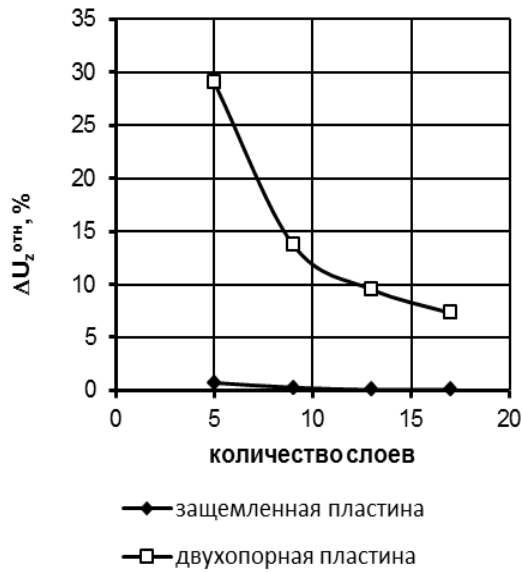


Рис. 8. Зависимость максимального относительного изменения прогиба (по отношению к сбалансированному состоянию) многослойных пластин от количества слоёв в них

Изменение прогиба вычислялось по формуле:

$$\Delta U = \frac{|U_{сбал} - U_{несбал}|}{U_{сбал}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{сбал}$  – прогиб пластины в сбалансированном состоянии,  $U_{несбал}$  – прогиб пластины в несбалансированном состоянии соответственно.

### Нарушение последовательности укладки

Рассмотрим влияние несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоёв, на многослойных композитных пластинах с двухопорным и защемлённым видами закрепления в зависимости от числа слоёв и варианта нарушения последовательности укладки. Начнём с пятислойной пластины, имеющей следующую структуру в сбалансированном состоянии:

$$(45 / -45 / 0 / -45 / 45)^0.$$

Варианты схем с нарушенной последовательностью укладки выглядят сле-

дующим образом:

а) нарушение последовательности укладки слоёв №5 и №4  $(45 / -45 / 0 / 45 / -45)^0$ ;

б) нарушение последовательности укладки слоёв №4 и №3  $(45 / -45 / -45 / 0 / 45)^0$ .

На рис. 9–11 показаны зависимости изменения прогиба и нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пятислойной пластины от варианта нарушения последовательности укладки слоёв и способа закрепления.

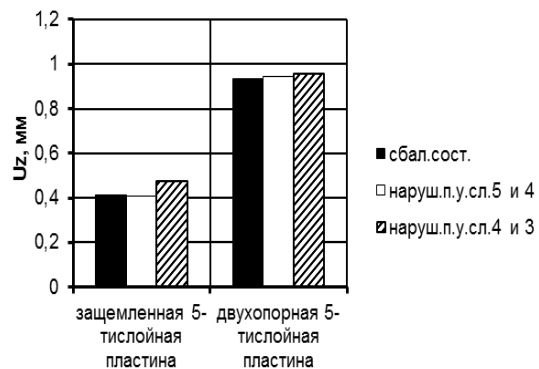


Рис. 9. Зависимость изменения прогиба пятислойных пластин от варианта нарушения последовательности укладки

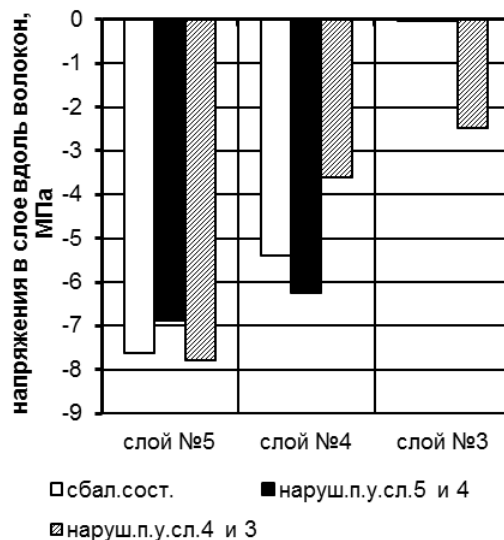


Рис. 10. Зависимость изменения нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пятислойной защемлённой пластины от варианта нарушения последовательности укладки

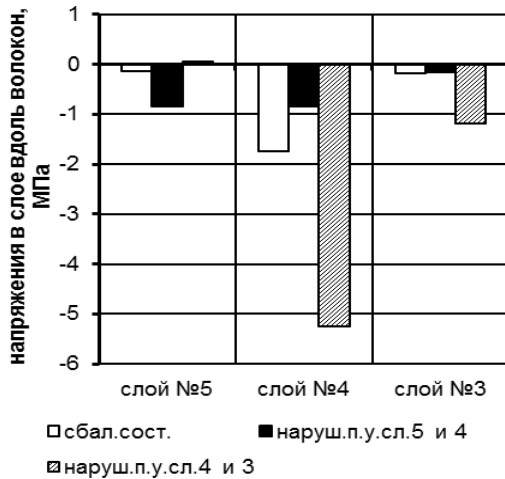


Рис. 11. Зависимость изменения нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пятислойной двухопорной пластины от варианта нарушения последовательности укладки

Оценим влияние числа слоёв на величину несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки. Структуры укладки в пластинах с числом слоёв более пяти аналогичны вышеуказанным. Для многослойных пластин был построен график относительного изменения прогиба в зависимости от числа слоёв в слоистом пакете и вида закрепления (рис. 12, 13).



Рис. 12. Зависимость относительного изменения прогиба (по отношению к сбалансированному состоянию) защемлённой пластины от числа слоёв и варианта нарушения последовательности укладки



Рис. 13. Зависимость относительного изменения прогиба (по отношению к сбалансированному состоянию) двухопорной пластины от числа слоёв и варианта нарушения последовательности укладки

Графики свидетельствуют о том, что нарушение последовательности укладки слоёв №3 и №4 (замена слоя  $\varphi^{(4)} = -45^\circ$  слоем  $\varphi^{(3)} = 0^\circ$ ) намного существеннее влияет на величину изменения прогибов, чем нарушение последовательности укладки слоёв №4 и №5 (когда слой  $\varphi^{(5)} = 45^\circ$  замещает слой  $\varphi^{(4)} = -45^\circ$ ). Изменение прогиба в первом случае составляет до 16%, во втором до 1...2%. С увеличением количества слоёв влияние несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоёв, на деформационное поведение уменьшается.

### Вывод

Нарушение сбалансированности слоистых структур пластин, вызванное отклонениями углов укладки слоёв от расчётных, приводит к изменению как деформационного поведения, так и напряжённого состояния. Изменение зависит от величин отклонений углов укладки, числа слоёв, вида нагружения и граничных условий закрепления пластин. При числе слоёв  $\geq 13$  влияние отклонений углов укладки в пределах  $\pm 5^\circ$  на величину максимального прогиба незначительно (не превышает 5%).

Влияние несбалансированности слоистых пластин, вызванной нарушением последовательности укладки слоёв, на их напряжённо-деформированное состояние зависит от варианта нарушения последовательности укладки, и с увеличением числа слоёв влияние несбалансированности уменьшается.

Таким образом, при изготовлении изделий из слоистых композиционных материалов необходим тщательный контроль над процессом укладки слоёв при формировании изделия.

#### Библиографический список

1. Пластинки и оболочки из стеклопластиков [Текст]: учеб. пособие для ву-

зов / В. Л. Бажанов, И. И. Гольденблат, В. А. Копнов и др.; под общ. ред. проф. И. И. Гольденבלата; М-во высш. и сред. спец. образования СССР. – М.: Высшая школа, 1970. – 408 с.

2. Лехницкий, С. Г. Анизотропные пластинки [Текст] / С. Г. Лехницкий. – М. – Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1947. – 354 с.

3. Первушин, Ю. С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов [Текст]: учеб. пособие / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2008. – 303с.

## PECULIARITIES OF STRAIN BEHAVIOUR AND STRESSED STATE OF PLATES MADE OF UNBALANCED LAMINATED COMPOSITE MATERIALS

© 2012 Y. S. Pervushin, P. V. Soloviev

Ufa State Aviation Technical University

The paper is devoted to the influence of unbalanced structures of multilayer composite materials produced by deviations of layer placement angles and faults in placement succession on the stressed state and strain behavior of laminated plates during bending. The influence of imbalance during bending is investigated on double-support restrained plates of rectangular cross-section acted upon by a load distributed over the surface for different numbers of layers. The results of imbalance influence on the strained and stressed state of multilayer plates are presented.

*Composite, lamina, imbalance, stress, strain, plate, anisotropy, orthotropy.*

#### Информация об авторах

**Первушин Юрий Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: [pcomposit@mail.ru](mailto:pcomposit@mail.ru). Область научных интересов: исследования в области механики и термомеханики композиционных материалов.

**Соловьёв Павел Владимирович**, аспирант кафедры сопротивления материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: [paulnightingale@mail.ru](mailto:paulnightingale@mail.ru). Область научных интересов: исследования в сфере механики стержневых конструкций из слоистых композиционных материалов.

**Pervushin Yuri Sergeevich**, doctor of technical sciences, professor of the department of strength of materials, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: [pcomposit@mail.ru](mailto:pcomposit@mail.ru). Area of research: mechanics and thermomechanics of composite materials.

**Soloviev Pavel Vladimirovich**, postgraduate student of the department of strength of materials, Ufa State Aviation Technical University. E-mail: [paulnightingale@mail.ru](mailto:paulnightingale@mail.ru). Area of research: mechanics of rod structures made of laminated composite materials.



УДК 621.983.7

## СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ШТАМПЕ С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ

©2012 И. П. Попов, Е. С. Нестеренко, М. В. Зимарев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Предложен новый способ штамповки тонкостенных конических деталей в штампе с упругим элементом. При этом условия формообразования значительно облегчены из-за ликвидации реактивных касательных напряжений на поверхности контакта детали и упругого элемента. Данный способ позволит увеличить высоту штампуемых деталей, предотвратить потери устойчивости штампуемой детали, повысить предельный суммарный коэффициент формоизменения.

*Упругие свойства, разнотолщинность, упругий элемент, коэффициент формоизменения, потеря устойчивости, раздача, реактивные касательные напряжения.*

В современных летательных аппаратах широкое применение нашли тонкостенные конические конструкции, которые получают из трубных заготовок: баллоны, обтекатели, переходники, компенсаторы, тяги управления и т.д. Используются конические детали не только в авиационной технике, но и других отраслях промышленности, например, в нефтегазодобывающей, химической, пищевой и др.

Изготовление тонкостенных конических деталей возможно за счёт использования следующих схем листовой штамповки: обжима, раздачи и обжима-раздачи трубной заготовки; вытяжкой и последующим обжимом.

Наиболее распространённым и простым способом получения данных деталей является обжим трубной заготовки. Недостатком этого способа является низкая высота штампуемых деталей, обусловленная тем, что в процессе формовки невозможно получить большие степени деформирования. Это объясняется тем, что в процессе штамповки краевая часть трубной заготовки обжиму не подвергается, т.е. не участвует в формообразовании. Кроме того, при достижении предельных степеней деформирования появляется вероятность потери устойчивости в результате действия напряжений, воз-

никающих от реактивных сил трения между матрицей и деталью [1].

Для устранения перечисленных недостатков предлагается для изготовления тонкостенных конических деталей совместить обжим трубной заготовки с раздачей и осуществлять данный процесс в штампе с упругим элементом.

Данный способ позволяет значительно расширить технологические возможности за счёт увеличения высоты штампуемых деталей.

Указанная цель достигается тем, что в процессе формовки производят уменьшение диаметра открытого торца детали путем приложения к её наружной боковой поверхности равномерно распределённого усилия, направленного вдоль образующей рабочей поверхности матрицы. Кроме того, происходит увеличение коэффициента деформирования за счёт совместного применения операций обжима и раздачи.

Упругий элемент выполнен из ленты, свёрнутой в конус. Он может быть изготовлен также из материала с более низким модулем упругости и более высоким пределом пропорциональности по сравнению со штампуемым материалом.

Схема процесса представлена на рис. 1.

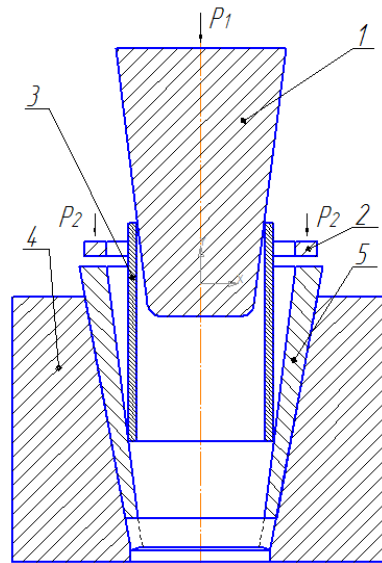


Рис. 1. Схема процесса штамповки с использованием упругого элемента:  
1-главный пуансон, 2- вспомогательный пуансон, 3-заготовка, 4-матрица, 5-упругий элемент

При приложении усилия к главному пуансону 1 последний передаёт усилие заготовке 3. При этом одновременно протекают две операции: обжим и раздача.

После того, как заготовка полностью вошла в матрицу 4, к упругому элементу прикладывается ударная нагрузка посредством вспомогательного пуансона 2. При ударах начинается совместное деформирование заготовки с упругим элементом 5. При совместном деформировании заготовки и упругого элемента условия формообразования значительно облегчены из-за ликвидации на её наружной поверхности реактивных касательных напряжений, которые переносятся на поверхность контакта между упругим элементом и матрицей.

Силы трения, возникающие между заготовкой и упругим элементом, играют активную роль, так как к наружной боковой поверхности прикладывается равномерно распределённое усилие, направление которого совпадает с направлением течения материала, в результате чего заготовка затягивается упругим элементом в очаг пластического деформирования.

Это приводит к предотвращению потери устойчивости заготовки и к увеличению суммарного коэффициента формоизменения.

При расчёте напряжений, возникающих в заготовке во время деформирования, использовалось обобщённое уравнение равновесия [2]:

$$r \frac{ds_r}{dr} + s_r - s_q - \frac{mr}{\sin a} \left( \frac{s_r}{R_r} + \frac{s_q}{R_q} \right) \quad (1)$$

условие пластичности для обжима:

$$\sigma_\theta = -\sigma_s; \quad (2)$$

условие пластичности для раздачи:

$$\sigma_\theta = \sigma_s + \sigma_p. \quad (3)$$

Напряжённо-деформированное состояние рассматривалось на двух этапах: 1-й – без воздействия на упругий элемент ударной нагрузки; 2-й – с воздействием на упругий элемент ударной нагрузки.

На каждом этапе рассматривалось по четыре участка: обжима, раздачи и два переходных участка свободногогиба. На рис. 2 показана деформируемая заготовка, на первом этапе разбитая на участки.

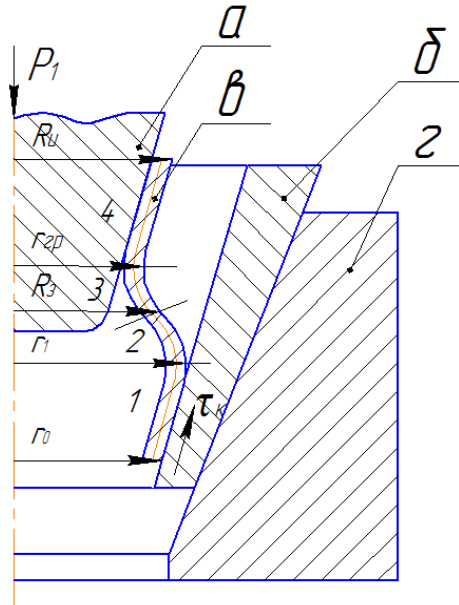


Рис. 2. Деформируемая заготовка на первом этапе:  
 1 – участок обжима, 2 – первый участок свободногогиба, 3 – второй участок свободногогиба,  
 4 – участок раздачи;  
 а – пуансон, б – упругий элемент, в – заготовка, г – матрица

На первом этапе формулы для определения напряжений в заготовке являются стандартными, их получают при подстановке в уравнение равновесия (1) условий пластичности (2) и (3). Соответственно напряжения на первом этапе на отдельных участках определяются по формулам:

для участка обжима:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left( 1 + \mu \operatorname{tg} \alpha \right) \left( 1 - \frac{r_0}{\rho} \right); \quad (4)$$

для первого участка свободногогиба:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left[ \begin{aligned} & 1 - \frac{r_1}{\rho} - (1 + \mu \operatorname{tg} \alpha) \left( 1 - \frac{r_0}{r_1} \right) \frac{r_1}{\rho} - \\ & - \frac{S}{4R_p} \frac{r_1}{\rho} \end{aligned} \right]; \quad (5)$$

для второго участка свободногогиба:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left[ \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left( 1 - \left( \frac{r_{rp}}{R_n} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right) - \frac{S}{4R_p} \right]; \quad (6)$$

для участка раздачи:

$$\sigma_p = -\sigma_s \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{R_n} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right]. \quad (7)$$

Отличие второго этапа от первого заключается в том, что силы трения, возникающие между заготовкой и упругим элементом, играют активную роль и способствуют деформированию заготовки.

Для участка обжима уравнение равновесия будет иметь вид:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta + \frac{\mu \rho}{\sin \alpha} \left( \frac{\sigma_p}{R_p} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) \quad (8)$$

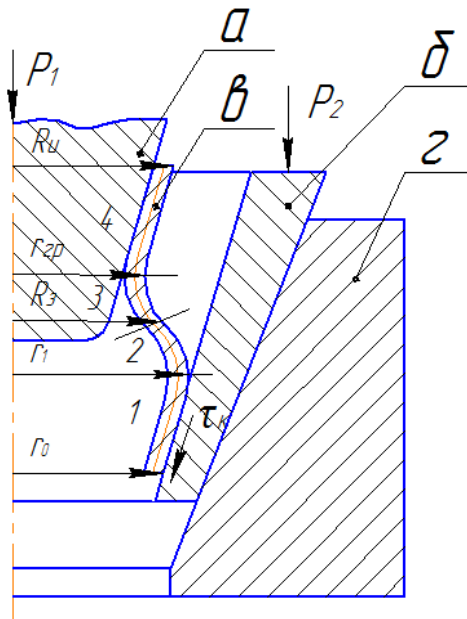


Рис. 3. Деформируемая заготовка на втором этапе:  
 1 – участок обжима, 2 – первый участок свободногогиба, 3 – второй участок свободногогиба,  
 4 – участок раздачи;  
 а – пуансон, б – упругий элемент, в – заготовка, з – матрица

Из выражений (8) и (2) напряжения на втором этапе для участка обжима определяются по формуле:

$$s_r = -s_s(1 - m \operatorname{ctg} a) \left( 1 - \frac{r_0}{r} \right) \quad (9)$$

Напряжения на других участках определяются по формулам (5), (6), (7) как и для первого этапа.

Распределение напряжений  $s_r$  по длине образующей детали показано на рис. 4.

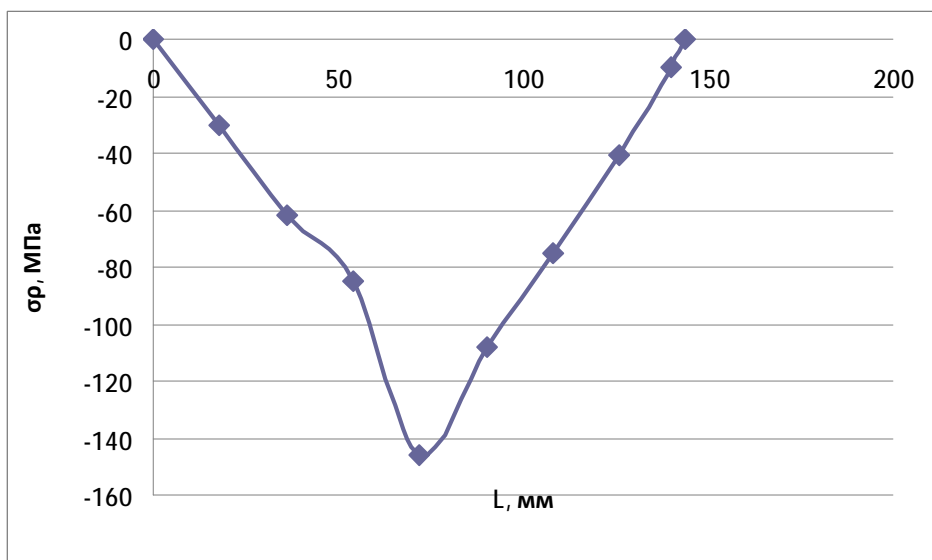


Рис. 4. Распределение напряжений  $s_r$  по длине образующей детали

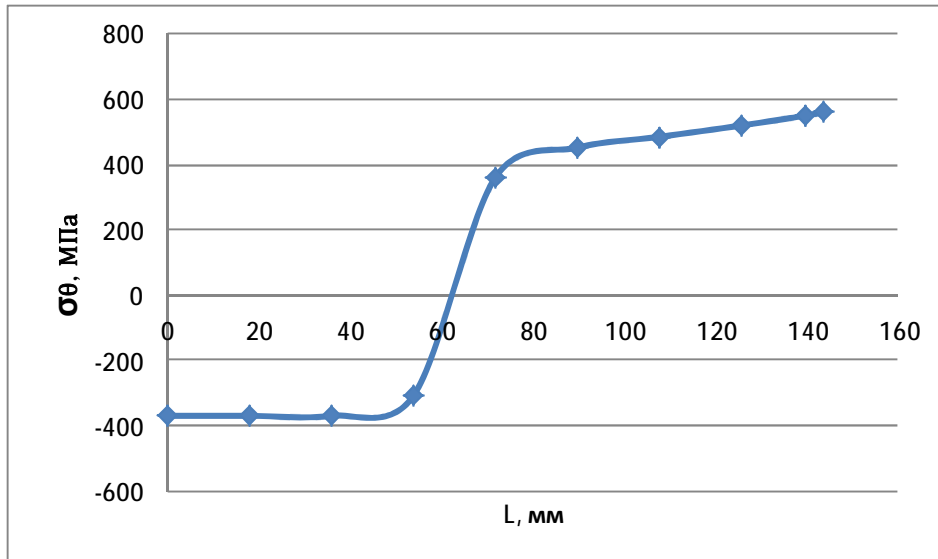


Рис. 5. Распределение напряжений  $S_q$  по длине образующей детали

Распределение напряжений  $S_q$  по длине образующей детали показано на рис.5. В итоге из-за ликвидации на наружной поверхности заготовки реактивных касательных напряжений и действия активных сил трения происходит увели-

чение предельного коэффициента формообразования. На рис. 6 представлен график зависимости максимальных напряжений внутри заготовки от суммарного коэффициента формообразования.

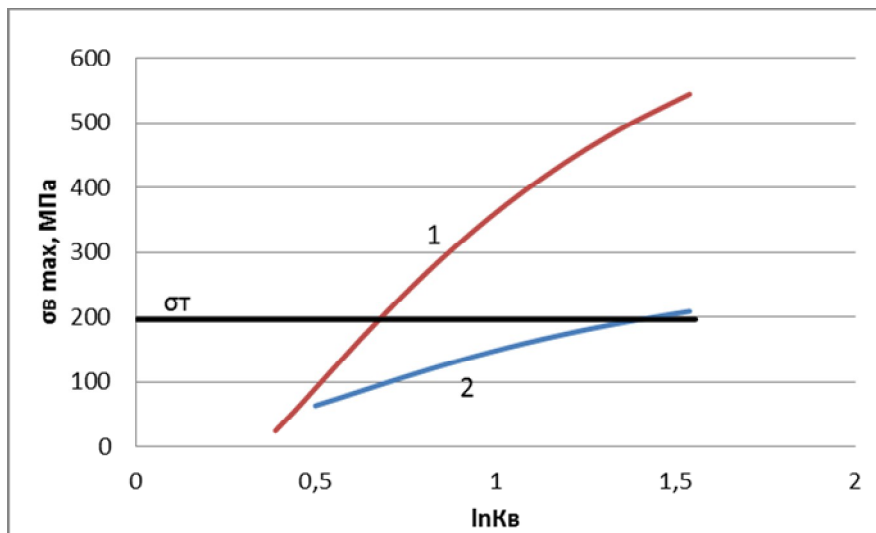


Рис. 6. График зависимости максимальных напряжений внутри заготовки от суммарного коэффициента формообразования: 1 – для процесса без упругого элемента; 2 – для процесса с использованием упругого элемента

Из графика видно, что применение упругого элемента в конструкции штампа позволит увеличить суммарный коэффи-

циент формообразования примерно в два раза.

### Технологические параметры процесса

Размеры трубной заготовка из стали 12x18н10т для совмещенного процесса обжима и раздачи следующие:

$H$  (высота заготовки) = 150 мм;

$d$  (внешний диаметр заготовки) = 100 мм;

$S_0$  (толщина стенки) = 6 мм.

Размеры упругого элемента, матрицы и пуансонов определяются исходя из геометрических размеров отштампованной детали.

Наибольший и наименьший внешние диаметры готовой детали определяются исходя из используемых коэффициентов обжима и раздачи и размеров заготовки по формулам [3]:

$$D_n = dk_{разд}; \quad (10)$$

$$d_n = \frac{d}{k_{обж}}. \quad (11)$$

Учитывая применяемые коэффициенты раздачи и обжима для стали 12x18н10т ( $K_{обж}=1,25$ ;  $K_{разд}=1,4$ ), наибольший и наименьший внешние диаметры готовой детали:  $D_n = 140$  мм;  $d_n = 80$  мм.

Высота отштампованной детали находится из условия равенства объёма заготовки и готовой детали:

$$H_k = 3 \frac{pr_{заг.н}^2 H - pr_{заг.в}^2 H}{p(R_n^2 + R_n r_n + r_n^2 - R_г^2 - R_г r_г - r_г^2)}, \quad (12)$$

где  $H_k$  - высота отштампованной детали, мм;  $H$  - высота заготовки, мм;  $r_{заг.н}$  - наружный радиус заготовки, мм;  $r_{заг.в}$  - внутренний радиус заготовки, мм;  $R_n$  - наибольший наружный радиус детали, мм;  $r_n$  - наименьший наружный радиус детали, мм;  $R_г$  - наибольший внутренний радиус детали, мм;  $r_г$  - наименьший внутренний радиус детали, мм.

Зная высоту и диаметры готовой детали, можно определить угол конусности детали:

$$\alpha = \arctg \left( \frac{R_n - r_n}{H_k} \right) \quad (13)$$

где  $\alpha$  - угол конусности детали, град.

В соответствии с размерами готовой детали подбираются размеры упругого элемента:

$$R_{упр.эл.в} \geq R_n; \quad (14)$$

$$r_{упр.эл.в} \leq r_n, \quad (15)$$

где  $R_{упр.эл.в}$  - наибольший внутренний радиус упругого элемента, мм;  $r_{упр.эл.в}$  - наименьший внутренний радиус упругого элемент, мм.

Высота упругого элемента  $H_{упр.эл}$  больше высоты готовой детали на 20-30 мм. Наибольшая толщина упругого элемента  $S_{упр} = 19$  мм, наименьшая толщина  $S_{упр} = 8$  мм.

Размеры главного пуансона должны обеспечивать возможность получения необходимой детали:

$$H_{п} > H_k; \quad (16)$$

$$R_{п} > R_г; \quad (17)$$

$$r_{п} < r_г, \quad (18)$$

где  $H_{п}$  - высота пуансона, мм;  $R_{п}$  - наибольший диаметр пуансона, мм;  $r_{п}$  - наименьший диаметр пуансона, мм.

Размеры матрицы:

$$R_M = R_{упр.эл.в} + S_{упр}; \quad (19)$$

$$r_M < r_{упр.эл.в} + S_{упр}; \quad (20)$$

$$H_M > H_{упр.эл.}, \quad (21)$$

где  $H_M$  - высота матрицы, мм;  $R_M$  и  $r_M$  - наибольший и наименьший радиусы матрицы, мм.

В результате расчётов были получены размеры:

готовой детали ( $D_n = 140$  мм;  $d_n = 80$  мм,  $H_k = 135,6$  мм,  $\alpha = 12,5^\circ$ ,  $S_0 = 6$ );

упругого элемента ( $R_{\text{упр.эл.в}} = 70$  мм,  $r_{\text{упр.эл.в}} = 37$  мм,  $H_{\text{упр.эл.в}} = 165$  мм,  $S_{\text{упр}} = 19$  мм,  $S_{\text{упр}} = 8$  мм);  
 пуансона ( $H_{\text{п}} = 155$  мм,  $R_{\text{п}} = 75$  мм,  $r_{\text{п}} = 35$  мм);  
 матрицы ( $R_{\text{м}} = 89$  мм,  $r_{\text{м}} = 40$  мм).

Общее усилие деформирования заготовки  $P_1$  складывается из усилия обжима и усилия раздачи [3]:

$$P_1 = P_{\text{обж}} + P_{\text{разд}} \quad (22)$$

Усилие обжима определяется по формуле [3]:

$$P_{\text{обж}} = gpdSs_{\alpha 0}, \quad (23)$$

где  $g = 1,1 \div 1,2$ ;  $d$  – диаметр заготовки, мм;  $S_0$  – толщина заготовки, мм.

Напряжение  $s_{\alpha 0}$  для процесса обжима определяется по формуле [3]:

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_{\text{s.ср}}}{2} (1 + \mu \text{ctg} \alpha) \left( 1 - \frac{d_{\text{н}}}{d} \right) \left( 1 + \sqrt{\frac{d}{d_{\text{н}}}} \right) \times (3 - 2 \cos \alpha). \quad (24)$$

Напряжение  $s_{\text{s.ср}}$  определяется по формуле [3]:

$$s_{\text{s.ср}} = 0,5 \left[ s_T + \frac{s_{\epsilon}}{n^n} \left( \ln \frac{d_{\text{н}}}{d} \right)^n \exp n \right], \quad (25)$$

где  $s_T$  – предел текучести;

$s_{\epsilon}$  – временное сопротивление разрыву, МПа;

$d_{\text{н}}$  – наименьший наружный диаметр детали, мм;

$n = \ln(1 + d_p)$  – показатель деформационного упрочнения.

Усилие раздачи определяется по формуле [3]:

$$P_{\text{разд}} = \gamma \pi d S \sigma_{\alpha 0}. \quad (26)$$

Напряжение  $\sigma_{\alpha 0}$  для процесса раздачи определяется по формуле [3]:

$$\sigma_{\alpha 0} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{4} \left( \frac{D_{\text{н}}}{d} + 1 \right) \times \left[ \left( \frac{D_{\text{н}}}{d} - 1 \right) (1 + \mu \text{ctg} \alpha) + 2 \sqrt{\frac{S_0}{D_{\text{н}}}} \sin \alpha \right] \times \left( 1 + \sqrt{\frac{d}{D_{\text{н}}}} \right) (3 - 2 \cos \alpha), \quad (27)$$

где  $D_{\text{н}}$  – наибольший наружный диаметр детали, мм.

Усилие  $P_2$  прикладываемое к упругому элементу, определяется по следующей формуле:

$$P_2 = s_{r(s_T)} S_T, \quad (28)$$

где  $S_T$  – площадь торцевой поверхности упругого элемента;

$s_{r(s_T)}$  – напряжения, действующие на торцевой поверхности упругого элемента.

Штамповую оснастку целесообразно изготавливать из инструментальных сталей, предназначенных для штампов холодной штамповки. Для упругого элемента применяли сталь 40, подвергая термообработке: отжиг при температуре 840..860 °С - 1 час, охлаждение в печи; полная закалка в воду при 840..860 °С - 20 мин; высокий отпуск при 550..600 °С - 20 мин, далее охлаждение на воздухе; азотирование при 550..600 °С - 55 часов (для повышения стойкости).

Для проверки теоретических расчётов оснастки процесс был смоделирован в программе Deform-2D. (марка материала – сталь 12х18н10т;  $D_{\text{н}} = 140$  мм;  $d_{\text{н}} = 80$  мм;  $S_0 = 6$  мм).

Результаты расчётов показали, что максимальная интенсивность напряжений в упругом элементе  $s_{i \text{max}} = 15,8$  МПа; напряжения внутри упругого элемента не превышают предела упругости материала (ст. 40), который равен 360 МПа, что говорит о том, что упругий элемент деформируется только в упругой зоне.

Также в результате моделирования была проанализирована разнотолщинность готового изделия. Был построен график изменения толщины стенки по

длине образующей конической детали, который представлен на рис. 7.

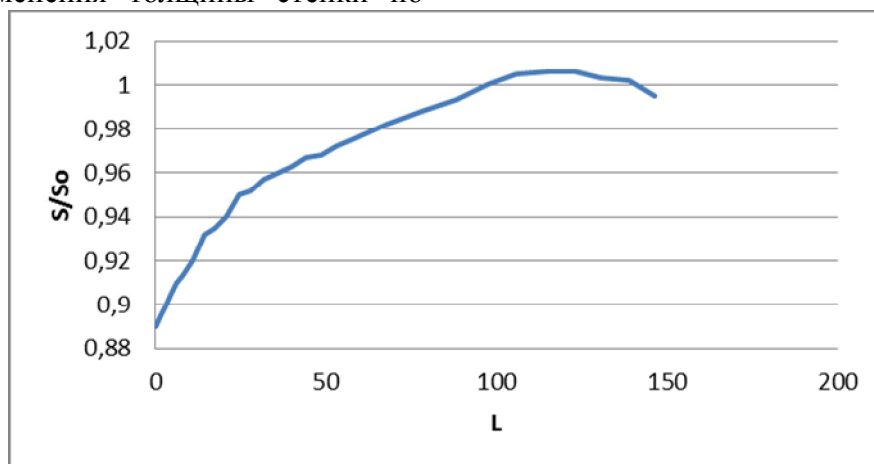


Рис. 7. Изменение толщины стенки детали по длине образующей (материал заготовки - сталь 12х18н10т;  $S_0=6$  мм)

Были определены максимальная и минимальная толщина стенки. Исходя из этого, определили относительную разнотолщинность по формуле:

$$\Delta S_{\text{отн}} = 100 \cdot \Delta S / S_{\text{cp}} = 100(S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) / S_{\text{cp}}. \quad (29)$$

Полученная разнотолщинность составила 11-12%.

Кроме того, в результате моделирования процесса было подтверждено, что при предельных степенях деформирования потери устойчивости заготовки не происходит.

#### Библиографический список

1. Пат. 1132407 СССР, МПК В21 Д22/28. Способ штамповки конусных деталей [Текст] / И. П. Попов, В. П. Чистяков, В. Д. Маслов, Г. А. Топоров, 1983.

2. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов [Текст] / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

1. Семёнов, Е. И. Ковка и штамповка [Текст] / Е. И. Семёнов - М.: Машиностроение, 1987. - 544 с.

## METHOD OF PRODUCING THIN-WALLED CONICAL PARTS IN A DIE WITH AN ELASTIC ELEMENT

©2012 I. P. Popov, E. S. Nesterenko, M. V. Zimarev

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

A new way forming of thin-walled conical parts in a die with an elastic element is proposed. In this method, the conditions of formation are considerably facilitated due to eliminating the reactive tangential stresses on the surface of the contact of the part and the elastic element. That will make it possible: to increase the height of stamped parts, to prevent losses of stability of the stamped part, to increase the maximum coefficient of forming.

*Elastic properties, variation in thickness, elastic element, coefficient of forming, loss of stability, expansion, reactive tangential stresses.*



### Информация об авторах

**Попов Игорь Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [nesterenko77@mail.ru](mailto:nesterenko77@mail.ru). Область научных интересов: листовая штамповка.

**Нестеренко Елена Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [nesterenko77@mail.ru](mailto:nesterenko77@mail.ru). Область научных интересов: листовая штамповка.

**Зимарев Максим Владимирович**, бакалавр техники и технологии по направлению «Металлургия», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [max.zim@mail.ru](mailto:max.zim@mail.ru). Область научных интересов: листовая штамповка.

**Popov Igor Petrovich**, doctor of technical science, professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [nesterenko77@mail.ru](mailto:nesterenko77@mail.ru). Area of research: sheet forming.

**Nesterenko Yelena Sergeyevna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [nesterenko77@mail.ru](mailto:nesterenko77@mail.ru). Area of research: sheet forming.

**Zimarev Maxim Vladimirovich**, bachelor of engineering and technology in metallurgy, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [max.zim@mail.ru](mailto:max.zim@mail.ru). Area of research: sheet forming.

УДК 621.73: 621.98: 004.9 (075.8)

## СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ ВЫРУБКИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

©2012 Е. Н. Почекуев, А. В. Скрипачев, П. Н. Шенбергер

Тольяттинский государственный университет

Рассматривается процесс системного проектирования последовательных разделительных штампов для вырубки листовых заготовок. Определены структурно-логические формулы, которые отражают возможные варианты конструкций этих штампов с учётом предложенных признаков узлов и деталей. Разработана математическая модель структуры штампов на основе методов дискретной математики.

*Проектирование разделительных штампов, холодная листовая штамповка, системное проектирование, иерархическое описание конструкции.*

Процесс подготовки заготовительных производств машиностроительной промышленности сопряжён с высокой трудоёмкостью и значительными финансовыми затратами.

В настоящее время данная проблема решается на основании эвристического алгоритма проектирования. Структурное описание алгоритма проектирования штамповой оснастки можно представить формулой:

$$A_{об} = E_1, E_2, \dots, E_n, \quad (1)$$

где  $A_{об}$  – обозначение обобщённого эвристического алгоритма;  $E_1, \dots, E_n$  – этапы проектирования.

Алгоритм решения задач проектирования штампов характеризуется циклическим повторением этапов разработки, что приводит к увеличению времени проектирования, к появлению ошибок, а также к возрастанию затрат на изготовление оснастки.

Внедрение вычислительной техники и новейшего программного обеспечения для конструирования штампов происходит на базе существующего метода проектирования. Эвристический алгоритм применяется в различных системах автоматизированного проектирования, таких, как SolidWorks со специализированным мо-

дулем Logopress, Siemens NX с приложениями Progressive Die Design, Die Engineering Wizard, Die Structure Desing, программный комплекс UNISYS/CADCEUS с приложением PRESSDESIGN, программный продукт VAMOS CAA, а также программный комплекс CATIA с приложением Die Tool Design.

Сравнение возможностей этих программных продуктов позволяет сделать общий вывод: работа с функционалами этих программ на базе эвристических алгоритмов сдерживает повышение производительности проектирования штамповой оснастки ввиду длительности проектных процедур.

Разделительные штампы для холодной листовой штамповки состоят из совокупности взаимодействующих узлов и компонентов, что характеризует их как сложный объект. В качестве методологической основы такой оснастки возможно использование системного подхода.

Системное проектирование программного обеспечения реализует представление сложного объекта в виде иерархической структуры взаимосвязанных узлов и деталей, что позволяет фиксировать целостные свойства объекта, его организацию и динамику. Такое проектирование осуществляют с помощью методов морфологического и конструктивного анализа, а также структурного синтеза, на ос-

нове дискретной математики с применением методов теории множеств, теории графов, булевой алгебры и т.д. [1, 2].

Разделительный штамп как объект проектирования можно представить как множество узлов и деталей ( $S_0$ ). К таким узлам относятся:

- группы рабочего инструмента штампа ( $R_0$ );
- плиты штампа ( $P_0$ );
- узлы направления движения плит ( $N_0$ );
- механизмы направления и фиксации материала ( $F_0$ );
- механизмы удаления и прижима материала ( $Y_0$ );
- механизмы ограничения хода подвижных деталей штампа ( $G_0$ );
- транспортные узлы ( $T_0$ );
- механизмы крепления штампа ( $K_0$ ).

В зависимости от назначения штампа состав и количество элементов множества может варьироваться.

Множество разделительного штампа  $S_0$  удобно представлять на основе структурно-морфологических матриц (2):

$$S_0 = \|R_0 P_0 N_0 F_0 Y_0 G_0 K_0 T_0\|, \quad (2)$$

где

$S_0$  – множество разделительного штампа для холодной листовой штамповки,

$R_0$  – подмножество групп рабочего инструмента,

$P_0$  – подмножество плит штампа,

$N_0$  – подмножество узла направления движения плит штампа,

$F_0$  – подмножество узла направления и фиксации материала,

$Y_0$  – подмножество узла удаления и прижима материала,

$G_0$  – подмножество узла ограничения хода подвижных механизмов штампа,

$K_0$  – подмножество механизмов крепления штампа,

$T_0$  – подмножество транспортных механизмов.

Элементы структурно-морфологической матрицы  $S_0$ , являющиеся узлами и

механизмами штампа, представляют собой подмножества  $S_0$  и также могут быть выражены в виде структурно-морфологических матриц. Примеры структурно-морфологических матриц групп рабочего инструмента ( $R_0$ ), узла направления движения плит штампа ( $N_0$ ) и узла направления и фиксации материала ( $F_0$ ) представлены в выражениях (3):

$$R_0 = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \\ R_{51} & R_{52} & 0 & 0 \\ R_{61} & R_{62} & 0 & 0 \\ R_{71} & R_{72} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$N_0 = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} & 0 & 0 \\ N_{21} & N_{22} & 0 & 0 \\ N_{31} & N_{32} & 0 & 0 \\ N_{41} & N_{42} & N_{43} & 0 \\ N_{51} & N_{52} & 0 & 0 \\ N_{61} & N_{62} & 0 & 0 \\ N_{71} & N_{72} & N_{73} & N_{74} \\ N_{81} & N_{82} & N_{83} & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$F_0 = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 & 0 & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 & 0 & 0 \\ F_{31} & F_{32} & 0 & 0 & 0 \\ F_{41} & F_{42} & F_{43} & 0 & 0 \\ F_{51} & F_{52} & 0 & 0 & 0 \\ F_{61} & F_{62} & F_{63} & F_{64} & F_{65} \\ F_{71} & F_{72} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где

$R_{ij}$  - детали групп рабочего инструмента ( $R_0$ ),

$N_{ij}$  - детали узла направления движения плит штампа ( $N_0$ ),

$F_{ij}$  - детали узла направления и фиксации материала ( $F_0$ ).

На основе разработанных структурно-морфологических матриц создаётся иерархическая модель разделительного

штампа с использованием условий единственности, которые заключаются в том, что из всех возможных конструктивных элементов может быть представлен только один

$$\bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{p=1}^e \bigcup_{q=1}^l ((B_{ij} \wedge \overline{B_{pq}}) \vee (\overline{B_{ij}} \wedge B_{pq})) = 1, \quad (4)$$

и ограничений на сочетаемость элементов:

$$\bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{p=1}^e \bigcup_{q=1}^l (B_{ij} \wedge B_{pq}) = 0, \quad (5)$$

где

$\vee$  - знак дизъюнкции, логическое сложение, «или»;

$\wedge$  - знак конъюнкции, логическое умножение, «и»;

$\overline{B_{ij}}$  - отрицание  $B_{ij}$ , инверсия, «не»  $B_{ij}$ ;

1 — истина;

0 — ложь;

$i = 1, \dots, n$ ;

$j = 1, \dots, m$ ;

$p = 1, \dots, e$ ;

$q = 1, \dots, l$ .

Ограничения на сочетаемость могут быть составлены как для деталей одного узла (5), так и для компонентов из различных механизмов:

$$\bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{p=1}^e \bigcup_{q=1}^l (A_{ij} \wedge B_{pq}) = 0. \quad (6)$$

Связи между членами и группами классификации устанавливаются логическими предложениями и высказываниями, формирующими базу знаний процесса проектирования.

В качестве примера рассмотрим условия единственности состояния групп в узлах и механизмах штампа в строго определенном положении с помощью терминов алгебры логики для групп рабочего инструмента:

$$(\overline{R_{21}} \wedge \overline{R_{22}} \wedge \overline{R_{23}}) \vee (\overline{R_{21}} \wedge R_{22} \wedge \overline{R_{23}}) \vee (\overline{R_{21}} \wedge \overline{R_{22}} \wedge R_{23}) = 1; \quad (8)$$

$$(\overline{R_{31}} \wedge \overline{R_{32}} \wedge \overline{R_{33}}) \vee (\overline{R_{31}} \wedge R_{32} \wedge \overline{R_{33}}) \vee (\overline{R_{31}} \wedge \overline{R_{32}} \wedge R_{33}) = 1; \quad (9)$$

$$(\overline{R_{41}} \wedge \overline{R_{42}} \wedge \overline{R_{43}} \wedge \overline{R_{44}}) \vee (\overline{R_{41}} \wedge \overline{R_{42}} \wedge \overline{R_{43}} \wedge R_{44}) \vee (\overline{R_{41}} \wedge \overline{R_{42}} \wedge R_{43} \wedge \overline{R_{44}}) \vee (\overline{R_{41}} \wedge \overline{R_{42}} \wedge R_{43} \wedge R_{44}) = 1; \quad (10)$$

$$(\overline{R_{51}} \wedge \overline{R_{52}}) \vee (\overline{R_{51}} \wedge R_{52}) = 1; \quad (11)$$

$$(\overline{R_{61}} \wedge \overline{R_{62}}) \vee (\overline{R_{61}} \wedge R_{62}) = 1; \quad (12)$$

$$(\overline{R_{71}} \wedge \overline{R_{72}}) \vee (\overline{R_{71}} \wedge R_{72}) = 1. \quad (13)$$

Например, истинное высказывание в выражении (7) означает: рабочий инструмент предназначен либо для вырубки ( $R_{11}$ ), либо пробивки ( $R_{12}$ ), а также или для отрезки ( $R_{13}$ ), или разрезки ( $R_{14}$ ).

К условиям единственности добавляются ограничения на сочетаемость членов групп состояний, в основе которых лежат функциональные, геометрические и технологические ограничения между узлами, механизмами и деталями штампа. Логические выражения, обуславливающие сочетаемость членов групп, приводят к ограничению базы знаний и сужению области конструкций до последовательных штампов вырубке заготовок:

$$R_{21} \wedge (R_{32} \vee R_{33}) = 0;$$

$$R_{22} \wedge (R_{31} \vee R_{33}) = 0;$$

$$R_{23} \wedge (R_{31} \vee R_{32}) = 0;$$

$$R_{31} \wedge (R_{43} \vee R_{44}) = 0;$$

$$R_{32} \wedge (R_{43} \vee R_{44}) = 0;$$

$$R_{33} \wedge (R_{41} \vee R_{42}) = 0;$$

$$R_{52} \wedge R_{62} = 0;$$

$$R_{62} \wedge (R_{71} \vee R_{72}) = 0.$$

$$(\overline{R_{11}} \wedge \overline{R_{12}} \wedge \overline{R_{13}} \wedge \overline{R_{14}}) \vee (\overline{R_{11}} \wedge R_{12} \wedge \overline{R_{13}} \wedge \overline{R_{14}}) \vee (\overline{R_{11}} \wedge \overline{R_{12}} \wedge R_{13} \wedge \overline{R_{14}}) \vee (\overline{R_{11}} \wedge \overline{R_{12}} \wedge \overline{R_{13}} \wedge R_{14}) = 1; \quad (14)$$

Первое ограничение в выражении (14) означает: если режущая кромка инструмента свыше 100 мм ( $R_{21}$ ), то нерационально использование в конструкции штампа цельных матрицы и пуансона с крепёжными полками ( $R_{32}$ ) или фланцем ( $R_{33}$ ).

При помощи равносильных преобразований алгебры логики формулируются условия ограничения на сочетаемость членов групп в истинных высказываниях. Для этого выполняется инверсия левых и правых частей условий ограничения:

$$\begin{aligned} \overline{R_{21} \wedge (R_{32} \vee R_{33})} &= \overline{R_{21}} \vee (\overline{R_{32}} \wedge \overline{R_{33}}) = 1; \\ \overline{R_{22} \wedge (R_{31} \vee R_{33})} &= \overline{R_{22}} \vee (\overline{R_{31}} \wedge \overline{R_{33}}) = 1; \\ \overline{R_{23} \wedge (R_{31} \vee R_{32})} &= \overline{R_{23}} \vee (\overline{R_{31}} \wedge \overline{R_{32}}) = 1; \\ \overline{R_{31} \wedge (R_{43} \vee R_{44})} &= \overline{R_{31}} \vee (\overline{R_{43}} \wedge \overline{R_{44}}) = 1; \\ \overline{R_{32} \wedge (R_{43} \vee R_{44})} &= \overline{R_{32}} \vee (\overline{R_{43}} \wedge \overline{R_{44}}) = 1; \\ \overline{R_{33} \wedge (R_{41} \vee R_{42})} &= \overline{R_{33}} \vee (\overline{R_{41}} \wedge \overline{R_{42}}) = 1; \\ \overline{R_{52} \wedge R_{62}} &= \overline{R_{52}} \wedge \overline{R_{62}} = 1; \\ \overline{R_{62} \wedge (R_{71} \vee R_{72})} &= \overline{R_{62}} \wedge (\overline{R_{71}} \vee \overline{R_{72}}) = 1. \end{aligned} \quad (15)$$

Для установления возможных связей между группами состояний логически перемножаются левые части условий единственности на левые части условий ограничения. Преобразование условий производится с помощью правил (аксиом) коммутативности для сложения и умножения, ассоциативности, идемпотентности, дистрибутивности и противоречия [3].

Ниже представлен результат умножения выражений (8), (9) и первого из группы (14):

$$\begin{aligned} &[\overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{33}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}}] [\overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \\ &\vee \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}}] [\overline{R_{21}} \vee \overline{R_{32}} \overline{R_{33}}] = \\ &= [\overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \\ &\vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \\ &\vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \\ &\vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}}] [\overline{R_{21}} \vee \\ &\vee \overline{R_{32}} \overline{R_{33}}] = \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \vee \\ &\vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}} \vee \\ &\vee \overline{R_{21}} \overline{R_{22}} \overline{R_{23}} \overline{R_{31}} \overline{R_{32}} \overline{R_{33}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для представления результата умножения в истинных высказываниях сокращаются члены с отрицанием из выражения (16) [3]:

$$\begin{aligned} &R_{22} R_{31} \vee R_{22} R_{32} \vee R_{23} R_{31} \vee R_{23} R_{32} \vee \\ &\vee R_{23} R_{33} \vee R_{21} R_{31}. \end{aligned} \quad (17)$$

Полученные выражения являются алгоритмом для разработки компьютерной программы с целью выявления возможных конструктивных признаков разделительных штампов.

Созданный код программы с помощью языка программирования C# на платформе NET показал, что количество возможных конструктивных признаков штампов зависит от глубины иерархии и числа уровней узлов и механизмов, а также определяется числом ограничений базы знаний.

Например, при описании модели последовательного разделительного штампа с использованием 47 условий единственности и 60 ограничений на сочетаемость расчёт программы приводит к получению  $4 \cdot 10^{13}$  структурных формул, отражающих возможные варианты конструкции, в которых хотя бы один элемент отличается по составу. Результат работы программы на основе трёх возможных конструкций штампа можно проанализировать с помощью следующих выражений

$$R_{11} \wedge R_{21} \wedge R_{31} \wedge R_{41} \wedge R_{51} \wedge R_{61} \wedge R_{71} \wedge P_{11} \wedge P_{21} \wedge P_{31} \wedge P_{41} \wedge N_{11} \wedge N_{21} \wedge N_{31} \wedge N_{42} \wedge N_{51} \wedge N_{61} \wedge N_{71} \wedge N_{82} \wedge F_{11} \wedge F_{21} \wedge F_{31} \wedge F_{41} \wedge F_{51} \wedge F_{61} \wedge F_{71} \wedge Y_{11} \wedge Y_{23} \wedge Y_{32} \wedge Y_{41} \wedge Y_{51} \wedge Y_{61} \wedge Y_{71} \wedge Y_{83} \wedge Y_{91} \wedge G_{11} \wedge G_{21} \wedge G_{32} \wedge G_{41} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{41} \wedge T_{51}; \tag{18}$$

$$R_{11} \wedge R_{21} \wedge R_{31} \wedge R_{41} \wedge R_{51} \wedge R_{61} \wedge R_{71} \wedge P_{11} \wedge P_{21} \wedge P_{31} \wedge P_{41} \wedge N_{11} \wedge N_{21} \wedge N_{31} \wedge N_{42} \wedge N_{51} \wedge N_{61} \wedge N_{71} \wedge N_{82} \wedge F_{11} \wedge F_{21} \wedge F_{31} \wedge F_{41} \wedge F_{51} \wedge F_{61} \wedge F_{71} \wedge Y_{11} \wedge Y_{23} \wedge Y_{32} \wedge Y_{41} \wedge Y_{51} \wedge Y_{61} \wedge Y_{71} \wedge Y_{83} \wedge Y_{91} \wedge G_{11} \wedge G_{21} \wedge G_{32} \wedge G_{41} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{41} \wedge T_{52}; \tag{19}$$

$$R_{11} \wedge R_{21} \wedge R_{31} \wedge R_{41} \wedge R_{51} \wedge R_{61} \wedge R_{71} \wedge P_{11} \wedge P_{21} \wedge P_{31} \wedge P_{41} \wedge N_{11} \wedge N_{21} \wedge N_{31} \wedge N_{42} \wedge N_{51} \wedge N_{61} \wedge N_{71} \wedge N_{82} \wedge F_{11} \wedge F_{21} \wedge F_{31} \wedge F_{41} \wedge F_{51} \wedge F_{61} \wedge F_{71} \wedge Y_{11} \wedge Y_{23} \wedge Y_{32} \wedge Y_{41} \wedge Y_{51} \wedge Y_{61} \wedge Y_{71} \wedge Y_{83} \wedge Y_{91} \wedge G_{11} \wedge G_{21} \wedge G_{32} \wedge G_{41} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{11} \wedge T_{21} \wedge T_{31} \wedge T_{41} \wedge T_{53}. \tag{20}$$

Показанные выражения отличаются элементами T<sub>51</sub>, T<sub>52</sub>, T<sub>53</sub>, которые говорят о том, что последовательный разделительный штамп может содержать либо накладные цапфы, либо грузовые винты, либо транспортные приливы. По остальным признакам эти конструкции совпадают.

Полученная иерархическая структура разделительного штампа для наглядности и компактности представления изображается в виде графа:

$$G = (V, E), \tag{21}$$

который является итогом строгой формальной обработки взаимосвязей между множествами возможных решений (вершины графа – V={R<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>, N<sub>0</sub>, F<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, G<sub>0</sub>, K<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>}) и множествами условий сочетаемости (рёбра графа – E={e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, ..., e<sub>m</sub>}), при которых возможны полученные конструкции штампов.

На рисунке 1 представлен граф для групп рабочего инструмента штампа, который отражает условия на сочетаемость элементов подмножества из выражения (13). По аналогичному принципу составляются графы для остальных узлов и механизмов конструкции.

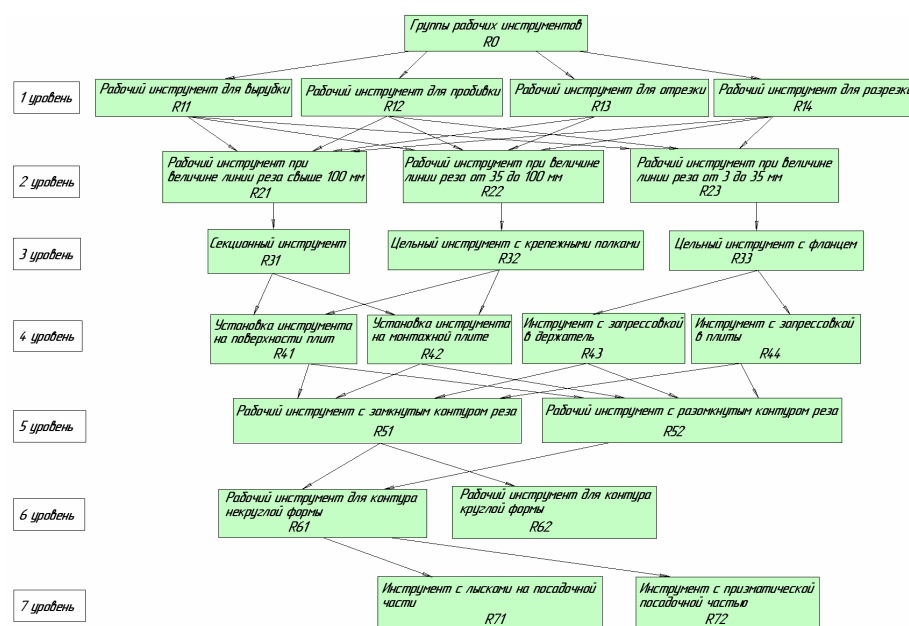


Рис. 1. Иерархическое описание структуры групп рабочего инструмента

Иерархия конструктивных признаков отдельных узлов и механизмов составляется на основе анализа существующих конструкций разделительных штампов [4, 5] и производственного опыта. Разбиение на иерархические уровни является вариативным и зависит от опыта разработчика и конкретной конструкции штампа.

Разделительный штамп как сборочная единица характеризуется рядом взаимосвязей между узлами и деталями, которые определяются параметрами формы, размеров, положения и посадки отдельных компонентов и узлов. Анализ кон-

структивных взаимосвязей позволил установить зависимости параметров одного механизма от параметров другого, что отражает влияние характеристик одного элемента на конструкцию других.

Решение задач синтеза конструкции находилось с помощью инструментов программы PLATINUM VPwin. Это позволило сформировать многоуровневую систему конструктивных взаимосвязей между узлами, механизмами и деталями штампа в сборке. Полученные данные в VPwin представлены в виде схемы на рисунке 2.

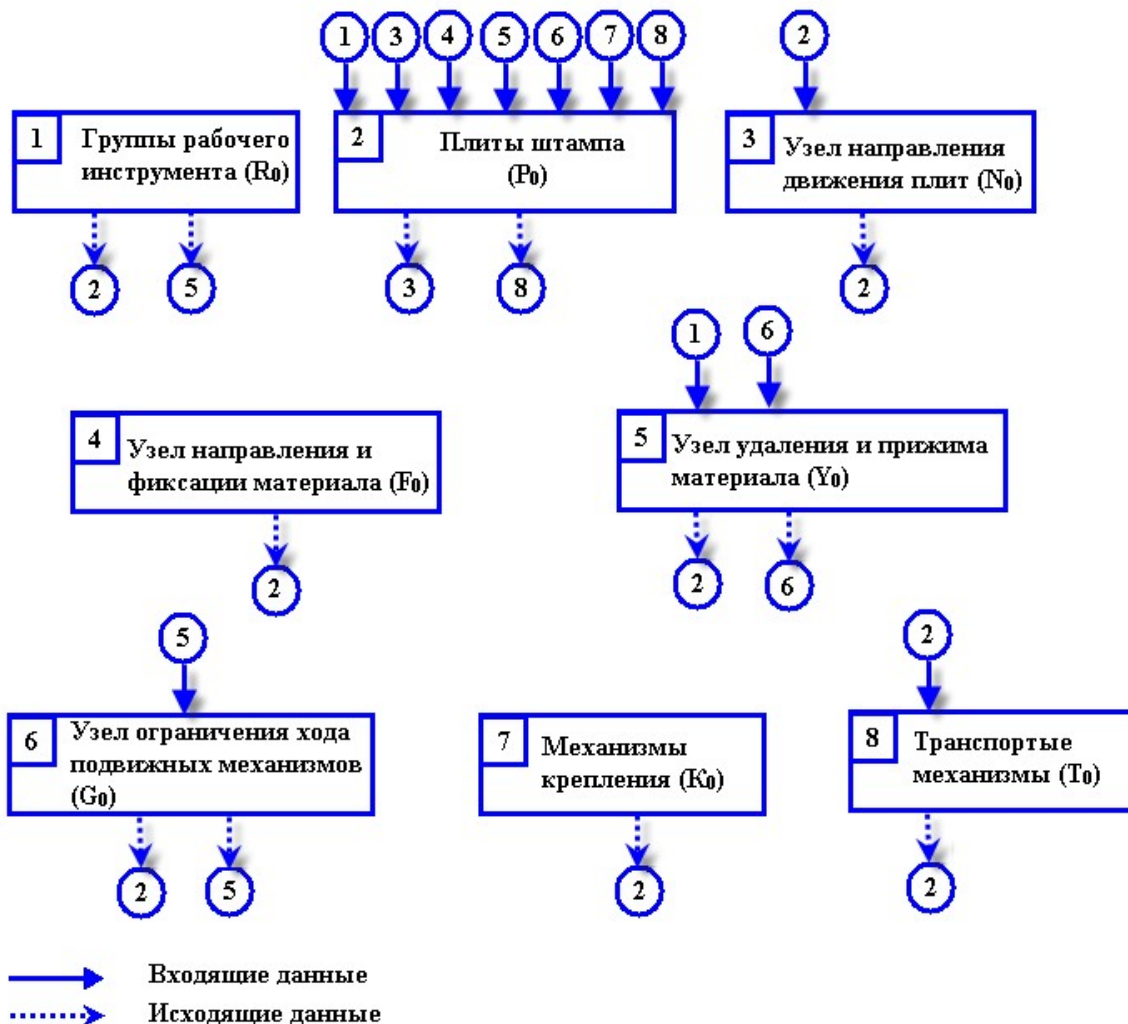


Рис. 2. Схема конструктивных взаимосвязей между элементами штампа

Например, взаимосвязь от групп рабочего инструмента к плитам штампа обозначает, что в зоне установки высота, форма и параметры позиционирования режущего инструмента оказывают влияние на габариты и геометрию плит верха и низа.

Модель иерархической структуры и найденные взаимосвязи нашли отражение в потоках данных созданной объектно-ориентированной программы проектирования последовательных разделительных штампов для вырубki листовой заготовки в среде NX OPEN на языке программирования C#.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Предложены методы системного подхода конструирования последовательных разделительных штампов для вырубki листовых заготовок.

2. На основе системного анализа конструкций разделительных штампов установлены соотношения, позволяющие получить иерархическое описание структуры штампа и выполнить анализ конструкционных взаимосвязей его узлов, механизмов и деталей.

3. Полученные структурно-логические формулы выявили возможные конструкции штампов с учётом предло-

женных признаков узлов и деталей, а также условий на сочетаемость элементов.

4. Разработана математическая модель структуры последовательных разделительных штампов для холодной листовой штамповки на основе методов дискретной математики.

#### Библиографический список

1. Кузнецов, О. П. Дискретная математика для инженера [Текст] / О. П. Кузнецов, Г. М. Адельсон-Вельский. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.

2. Почекуев, Е. Н. Структурно-логическое проектирование штампов листовой штамповки В САПР [Текст] / Е. Н. Почекуев, И. Ю. Зубанов // Межвузовский сборник научных трудов. – Тольятти, 2000. – 74-79 с.

3. Яглом, И. М. Булева структура и её модели [Текст] / И. М. Яглом. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с.

4. Листовая штамповка: справочник конструктора штампов [Текст] / В. Л. Марченко [и др.]; под ред. Л. И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.

5. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.

## SYSTEM DESIGN OF FOLLOW SHEARING DIES FOR CUTTING SHEET BLANK

© 2012 E. N. Pochekuev, A. V. Skripachev, P. N. Shenberger

Togliatti State University

We consider the process of system design of follow shearing dies for cutting sheet blanks. Structural and logical formulas are defined and they represent possible designs of these dies with the proposed signs of assemblies and parts. A mathematical model of the structure of dies is developed based on the methods of discrete mathematics.

*Designing shearing dies, cold sheet stamping, system design, hierarchical design description.*



### Информация об авторах

**Почекуев Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, Тольяттинский государственный университет. E-mail: [enpster@gmail.com](mailto:enpster@gmail.com). Область научных интересов: обработка металлов давлением, системы автоматизированного проектирования.

**Скрипачев Александр Викторович**, кандидат технических наук, директор Автомеханического института Тольяттинского государственного университета. E-mail: [sav54@tltsu.ru](mailto:sav54@tltsu.ru). Область научных интересов: обработка металлов давлением.

**Шенбергер Полина Николаевна**, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: [Shenberger@tltsu.ru](mailto:Shenberger@tltsu.ru). Область научных интересов: обработка металлов давлением, системы автоматизированного проектирования.

**Pochekuev Eugeny Nikolaevitch**, candidate of technical science, Togliatti State University. E-mail: [enpster@gmail.com](mailto:enpster@gmail.com). Area of research: metal forming, computer aided design.

**Skripachev Alexander Viktorovitch**, candidate of technical science, director of the Automotive Institute of Togliatti State University. E-mail: [sav54@tltsu.ru](mailto:sav54@tltsu.ru). Area of research: metal forming.

**Shenberger Polina Nikolaevna**, post-graduate student, Togliatti State University. E-mail: [Shenberger@tltsu.ru](mailto:Shenberger@tltsu.ru). Area of research: metal forming, computer aided design.

УДК 621.9.048.6: 539.319

## ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2012 О. В. Ромашкина<sup>1</sup>, О. В. Каранаева<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный технический университет<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрено влияние величины и направления ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы на величину и знак остаточных напряжений и на их распределение в поверхностном слое деталей из титановых сплавов. Полученные результаты подтверждают реальные перспективы повышения характеристик сопротивления усталости резьбовых деталей путём изменения различных технологических параметров ультразвуковой обработки.

*Радиальные, осевые, тангенциальные ультразвуковые колебания, остаточные напряжения, поверхностный слой, сопротивление усталости, резьбовые детали, титановые сплавы.*

Работоспособность деталей машин в значительной степени зависит от физико-механических характеристик материала и технологии изготовления. Титановые сплавы имеют малый вес и обладают высокими прочностными характеристиками, поэтому в ответственных узлах, например летательных аппаратов и их двигателей, широко применяются резьбовые детали из титановых сплавов. При этом ответственные резьбовые детали из титановых сплавов в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок при достаточно высоком температурном режиме и эксплуатируются с растягивающими напряжениями. Проведённые исследования и производственный опыт показали, что виды механической обработки и параметры режимов резания оказывают существенное влияние на сопротивление усталости резьбовых деталей из титановых сплавов. При этом для повышения качественных характеристик поверхностного слоя желательно сформировать в поверхностном слое максимально возможные сжимающие остаточные напряжения. Практическое значение, с точки зрения сопротивления усталости, имеют остаточные на-

пряжения в поверхностном слое наименьшего сечения, а именно во впадинах резьбы.

Для определения остаточных напряжений в резьбовых деталях малого диаметра была использована специальная методика, разработанная С.И. Ивановым и В.Ф. Павловым [1], на основании которой были определены остаточные напряжения, формирующиеся во впадинах резьбы.

В соответствии с этой методикой удаляются слои материала с части поверхности нескольких впадин резьбы детали и измеряются возникающие при этом перемещения детали с удлинителем. Деформации возникают при удалении напряжённого поверхностного слоя некоторой толщины во впадинах резьбы, являющихся концентраторами напряжений.

При помощи специальных ультразвуковых резьбонарезных устройств осуществлялось нарезание наружных резьб М5, М6, М8 на образцах, изготовленных из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ВТ16.

Нарезание резьбы проводилось при сообщении резьбообразующему инструменту радиальных, осевых и тангенциальных ультразвуковых колебаний с амплитудой  $x = 5$  мкм и частотой  $f = 18 - 22$  кГц.

Режимы резания: скорость резания  $V = 0,8 - 1,2$  м/мин, глубина резания  $t = 0,2 - 0,34$  мм. Для сопоставления результатов исследования проводилось также нарезание резьбы без наложения на инструмент ультразвуковых колебаний.

Осевые ( $\sigma_z^{res}$ ) остаточные напряжения определялись по следующей формуле:

$$\sigma_z^{res}(h_j) = \frac{C}{X_p(h_j)} \left[ \frac{df(h)}{d(h)} \right]_j$$

Здесь  $X_p(h_j)$  – коэффициент, учитывающий масштабный фактор;  $f(h)$  – перемещение образца;  $h$  – глубина поверхностного слоя;  $C$  – коэффициент, зависящий от материала и длины образца, который определяется по зависимости:

$$C = \frac{E}{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu) \times \left[ (L - l) \frac{1}{P} + \frac{l^2}{2P} \right]}$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $L$  – длина образца с удлинителем;  $l$  – длина образца;  $P$  – шаг резьбы.

По приведённой методике были определены осевые остаточные напряжения  $\sigma_z^{res}$ , формирующиеся в поверхностном слое впадины резьбы при введении в зону резания радиальных, осевых и тангенциальных ультразвуковых колебаний.

На рис. 1 – 3 приведены эпюры осевых остаточных напряжений  $\sigma_z^{res}$  по глубине поверхностного слоя  $h$  во впадинах резьбы.

Величина и направление ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы оказывают значительное влияние на величину и знак остаточных напряжений, а также на их распределение в поверхностном слое.

На рис. 1 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М5х1 при обработке титанового сплава ВТЗ-1 (режимы обработки: скорость резания  $V = 0,8$  м/мин,

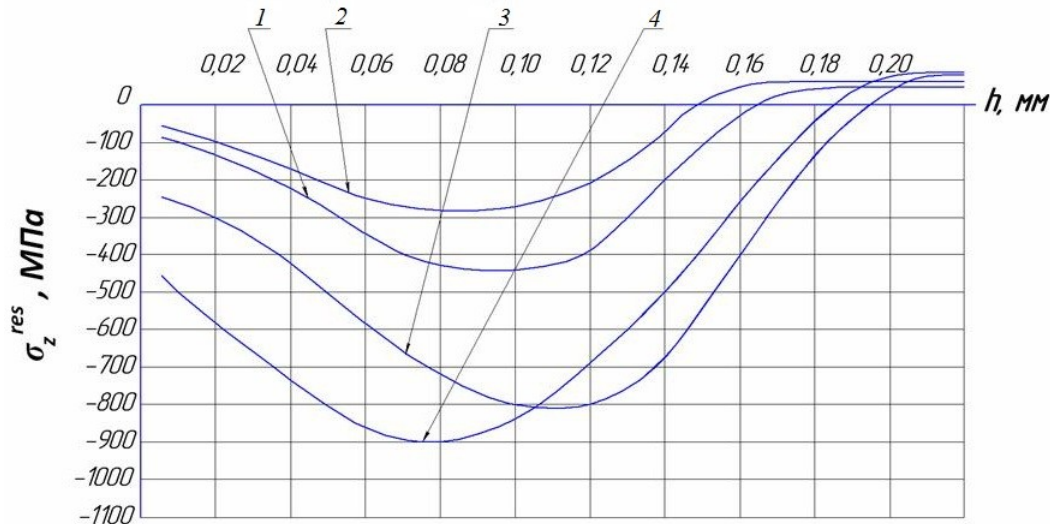


Рис. 1. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М5 при обработке титанового сплава ВТЗ-1:

1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;

3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфофрезол).

Из представленных графиков видно, что в поверхностном слое формиру-

ются сжимающие остаточные напряжения. Характер распределения сжимающих остаточных напряжений значительно отличается в зависимости от вида ультразвуковых колебаний. Так, при обработке с радиальными ультразвуковыми колеба-

ниями формируются максимальные по величине сжимающие остаточные напряжения, как около поверхности (- 400 МПа), так и в подповерхностном слое: на глубине 0,08 мм они достигают максимальных значений – около 900 МПа. Близкий характер распределения сжимающих остаточных напряжений получен при нарезании резьб с осевыми ультразвуковыми колебаниями. В этом случае около поверхности формируются сжимающие остаточные напряжения, равные - 230 МПа, а своего наибольшего значения – 800 МПа они достигают на глубине 0,10 – 0,12 мм.

При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями около поверхности сжимающие остаточные напряжения близки к нулю и достигают наибольшего значения на глубине 0,08 мм: - 280 МПа; при достижении глубины 0,15 мм остаточные напряжения меняют свой знак на противоположный, т.е. становятся растягивающими напряжениями.

Для проведения сравнительного анализа осуществлялось нарезание резьб

без введения в зону резания ультразвуковых колебаний. В этом случае около поверхности формируются незначительные сжимающие остаточные напряжения, равные - 80 МПа, затем они достигают наибольшего значения на глубине 0,08 – 0,12 мм, равного - 420 МПа.

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что с точки зрения формирования в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений наиболее предпочтительной является обработка с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями.

На рис. 2 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М6х1 при обработке титанового сплава ВТ9 (режимы обработки: скорость резания  $V = 1,0$  м/мин, частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфифрезол).

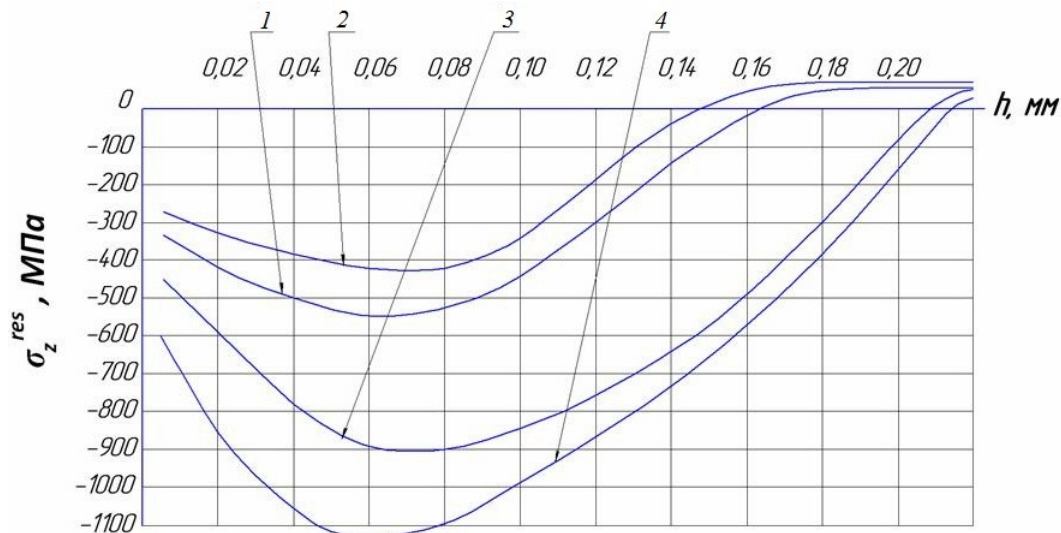


Рис. 2. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М6 при обработке титанового сплава ВТ9:

- 1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;  
3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Анализируя представленные на рис. 2 результаты, можно сделать следующие выводы. Формируются значительные сжимающие остаточные напряжения уже на глубине 0,06 мм (от - 400 МПа до - 1100 МПа), причём смена знака на противоположный происходит на глубине от 0,14 мм до 0,22 мм. При этом наибольшие сжимающие остаточные напряжения также формируются при обработке с радиальными и осевыми ультразвуковыми колебаниями, а наложение на инструмент тангенциальных колебаний

приводит к их уменьшению до значений порядка - 400 МПа.

На рис. 3 приведены графики влияния направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М8х1,25 при обработке титанового сплава ВТ16 (режимы обработки: скорость резания  $V = 1,2$  м/мин, частота ультразвуковых колебаний  $f = 20 \pm 1$  кГц, амплитуда ультразвуковых колебаний  $x = 5$  мкм, технологическая среда – сульфозол).

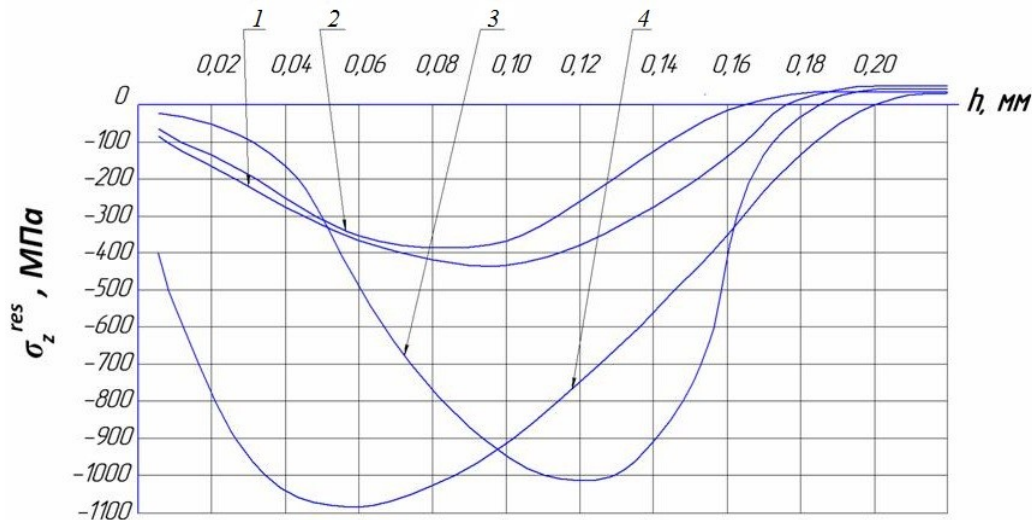


Рис. 3. Влияние направления ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений во впадинах резьбы М8 при обработке титанового сплава ВТ-16:

- 1 – обычное резание; 2 – резание с тангенциальными колебаниями;
- 3 – резание с осевыми колебаниями; 4 – резание с радиальными колебаниями

Из полученных данных видно, что при обычном резбонарезании и при нарезании резьбы с тангенциальными и осевыми колебаниями на поверхности сжимающие остаточные напряжения близки к нулю, а при введении в зону резания радиальных ультразвуковых колебаний достигают около поверхности величины - 200 МПа. Однако уже на глубине залегания 0,05 мм в случае обработки с радиальными ультразвуковыми колебаниями остаточные напряжения достигают значений около - 1100 МПа, т.е. наблюдается существенный рост сжимающих остаточных напряжений. При обработке с осевыми ультразвуковыми колебаниями также имеет место резкое увеличение сжимающих остаточных напряжений, однако это

происходит на глубине от 0,04 до 0,12 мм, а затем наблюдается их резкое уменьшение и на глубине 0,19 мм происходит смена на растягивающие остаточные напряжения. При обработке с тангенциальными ультразвуковыми колебаниями также имеет место незначительное уменьшение сжимающих остаточных напряжений по сравнению с обычной обработкой.

Можно сделать следующие выводы. Наложение на инструмент тангенциальных ультразвуковых колебаний приводит к снижению значений сжимающих остаточных напряжений. В первую очередь это связано с тем, что тангенциальные ультразвуковые колебания изменяют процесс стружкообразования, интенсифицируют дислокационные процессы и умень-

шают силы резания. Введение в зону резания осевых или радиальных ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы позволяет значительно увеличить сжимающие остаточные напряжения. В этом случае увеличение сжимающих остаточных напряжений связано с упрочняющим эффектом.

Таким образом, установлено, что для формирования в поверхностном слое благоприятных наибольших сжимающих остаточных напряжений при ультразвуковом резбонарезании следует производить

окончательную обработку с радиальными или осевыми ультразвуковыми колебаниями.

### Библиографический список

1. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей [Текст] / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, Г. В. Коновалов и др. - М.: МАП Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1992. – 192 с.

## INFLUENCE OF THE DIRECTION OF ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES IN THREAD PIECES MADE OF TITANIUM ALLOYS

© 2012 O. V. Romashkina<sup>1</sup>, O. V. Karanaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The paper deals with the influence of magnitude and direction of ultrasound vibrations in the process of thread cutting on the magnitude and sign of residual stresses and their distribution in the surface layer of pieces made of titanium alloys. The results obtained confirm real prospects of improving the characteristics of fatigue resistance of thread pieces by changing various technological parameters of ultrasonic treatment.

*Radial, axial, tangential ultrasonic vibrations, residual pressure, surface layer, fatigue resistance thread pieces, titanium alloys.*

### Информация об авторах

**Ромашкина Оксана Викторовна**, старший преподаватель кафедры инструментальных систем и сервиса автомобилей, Самарский государственный технический университет. E-mail: [romashkina921@mail.ru](mailto:romashkina921@mail.ru). Область научных интересов: повышение эффективности механической обработки путём применения ультразвука.

**Каранаева Оксана Валериевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [karanaeva@mail.ru](mailto:karanaeva@mail.ru). Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

**Romashkina Oksana Viktorovna**, senior lecturer of the department of development systems and car service, Samara State Technical University. E-mail: [romashkina921@mail.ru](mailto:romashkina921@mail.ru). Area of research: increasing the efficiency of machining using ultrasound.

**Karanaeva Oksana Valerievna**, candidate of technical science, associate professor of the department of strength of materials, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [karanaeva@mail.ru](mailto:karanaeva@mail.ru). Area of research: residual stress mechanics.

УДК 669.715

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2012 О. Г. Савельева

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Установлена связь между структурными показателями и механическими свойствами алюминиевых сплавов АМг10 и Д16. Определены факторы, которые зависят от изменения структуры и с которыми напрямую связаны механические и технологические свойства материалов. Проанализировано влияние режимов пластической деформации, рекристаллизационного отжига, а также старения на формирование остаточных напряжений I, II и III рода.

*Механические свойства, остаточные напряжения, структурные показатели, рекристаллизационный отжиг, старение, пластическая деформация.*

### Введение

Получение особых свойств материалов, используемых в высокотехнологичных конструкциях, приводит к необходимости создания специальных материалов.

Обеспечение требуемых качественных показателей изделий является актуальной задачей. Остаточные напряжения в поверхностных слоях материала относятся к числу факторов, существенно влияющих на многие характеристики качества изделий. Качественное и количественное влияние таких напряжений на целый ряд функциональных свойств изделий требует дальнейшего изучения.

Опыт эксплуатации изделий и многочисленные эксперименты показывают, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и долговечность изделий. Особенно велико их влияние на геометрическую точность изделий.

Целью данной работы является установление зависимостей между режимами обработки, механическими и технологическими характеристиками, структурными параметрами и уровнем остаточных напряжений, сформированных в процессе

изготовления деталей. Знание зависимостей необходимо для повышения точности изготовленных изделий, стабильности их свойств, формы и размеров в процессе хранения и эксплуатации готовых изделий.

Необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние состояния поставки материала на уровень и распределение остаточных напряжений.
2. Разработать математическую модель расчёта остаточных напряжений с учётом реальной структуры.

В зависимости от объёма, в котором остаточные напряжения уравниваются, классифицируют следующие виды напряжений: макронапряжения (напряжения I рода) – упругие искажения, уравнивающиеся в объёме всего изделия или в его значительной части; микронапряжения (напряжения II рода) – напряжения, которые уравниваются в объёме отдельных кристаллитов или частей кристаллитов (мозаичных блоков); статические искажения решётки (напряжения III рода) – напряжения, которые уравниваются в пределах небольших групп атомов [1].

### Методика проведения исследований

Для нахождения взаимосвязи структуры, режимов термической обработки и пластической деформации были исследованы механические характеристики, изменение структуры в зависимости от термической обработки и пластической деформации с учётом остаточных напряжений I, II и III рода. На основании обработки полученных экспериментальных данных были предложены математические зависимости изменения остаточных напряжений от термического воздействия и пластической деформации.

Исследования проводили на высокопрочных алюминиевых сплавах АМг10 и Д16, химический состав которых представлен в табл. 1 и 2.

Для определения влияния состояния поставки на механические свойства сплавов АМг10 и Д16 проводились статические испытания на растяжение по ГОСТ 1497–84 [4] отожжённых (при температуре отжига  $T_{от}=430^{\circ}\text{C}$  для сплава АМг10,  $T_{от}=500^{\circ}\text{C}$  для сплава Д16) и закалённых с

последующим искусственным старением образцах (при температуре закалки  $T_3=430^{\circ}\text{C}$  для сплава АМг10,  $T_3=500^{\circ}\text{C}$  для сплава Д16).

Для установления зависимости внутренних напряжений от степени пластической деформации образцы подвергали растяжению при различных степенях пластической деформации  $\varepsilon_i$  (табл. 3).

Таблица 1. Химический состав сплава АМг10, % по массе [2]

Mg	Zr	Be	Ti	B	Cu	Co	Al
10,50	0,11	0,08	0,018	0,01	0,001	0,015	89,266

Таблица 2. Химический состав сплава Д16, % по массе [3]

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
0,5	0,5	0,66	0,04	0,15	92,36	4,26	1,28	0,25

Таблица 3. Степень деформации образцов из сплавов Д16 и АМг10

Сплав	Отожжённые образцы					Закалённые и состаренные образцы				
	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\varepsilon_5, \%$	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$	$\varepsilon_5, \%$
АМг10	8,0	12,1	16,1	18,2	28,9	8,0	12,1	16,1	18,3	21,0
Д16	11,6	12,5	15,6	16,4	25,9	11,7	14,5	17,2	18,4	22,4

Для проведения металлографического анализа из каждого образца после отжига и закалки с последующим старением с различными степенями деформации изготовлены два микрошлифа (один - из участка очага деформации, второй - из участка отсутствия деформации) для каждого исследуемого материала. По фотографиям со структурой образцов в различном состоянии поставки осуществлялся замер длины ( $L$ ) и вычислялась деформация зёрен по длине образца по формуле

(1) каждого микрошлифа для выявления характера влияния режимов термической обработки и пластической деформации на формирование структуры и механические свойства:

$$e_d = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\Delta l = l_k - l_0$  - изменение размера зерна после деформации, мкм;

$l_k$  - размер зерна образца после деформации, мкм;

$l_0$  - размер зерна исходного образца, мкм.



Для определения остаточных напряжений в сплавах проводился рентгеноструктурный анализ. Дифрактограммы снимались с отожженных, закалённых с последующим старением образцов с различными степенями деформаций из сплавов АМг10 и Д16. По уширению линий дифрактограммы (111) или (200) определялся размер областей когерентного рассеяния (ОКР). Микронапряжения рассчитывались по уширению линий (220) и (331) [1].

На основании полученных экспериментальных данных были выявлены зависимости изменения остаточных напряжений от термического воздействия и пластической деформации.

### **Разработка математической модели влияния пластической деформации и термической обработки на формирование требуемой структуры**

Показателями, характеризующими пластическую деформацию, являются её степень, температура и скорость. В работе рассматривается пластическое деформирование на примере листовой штамповки, при которой скорость деформации и температуру можно принять постоянной. Поэтому при установлении зависимости остаточных напряжений влияющим фактором является степень пластической деформации. При этом значительные изменения будут претерпевать напряжения I и II рода. Изменения напряжений III рода незначительны и поэтому ими пренебрегаем.

В определённом приближении можно сказать, что изменение остаточных напряжений пропорционально истинному сопротивлению деформированию сплава, которое в свою очередь связано с истинной степенью деформации. Наиболее точно это описывает кривая упрочнения металла. Остаточные напряжения, формирующиеся в процессе пластической деформации, находим из выражения:

$$ds_{I\text{ ПД}} + ds_{II\text{ ПД}} = ds_i, \quad (2)$$

где  $s_i = f(e_i)$  - уравнение кривой упрочнения.

Дифференцируя выражение (2), получаем уравнение для  $d\sigma_i$ :

$$ds_i = f'(e_i)de_i. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений от действия пластической деформации:

$$ds_{I\text{ ПД}} + ds_{II\text{ ПД}} = f'(e_i)de. \quad (4)$$

Интегрируя (4), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после пластической деформации:

$$s_{I\text{ ПД}} + s_{II\text{ ПД}} = F_1(e_i) + C_1, \quad (5)$$

где  $F_1(\varepsilon_i)$  – первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения степени пластической деформации.

При условии  $\varepsilon_i=0, \sigma_{I\text{ ПД}} + \sigma_{II\text{ ПД}}=0$  получаем  $C_1=0$ :

$$s_{I\text{ ПД}} + s_{II\text{ ПД}} = F_1(e_i). \quad (6)$$

Рекристаллизационный отжиг и старение влияют на формирование окончательной структуры полуфабрикатов и заготовок из алюминиевых сплавов. Также на изменение структуры и свойств влияет полигонизация, но её влияние на формирование остаточных напряжений подавляется последующей рекристаллизацией. Поэтому этот вид термической обработки в работе не рассматривается.

Формирование структуры при рекристаллизации и старении зависит от скорости нагрева и охлаждения, температуры и продолжительности выдержки, степени предшествующей деформации.

Уровень остаточных напряжений в процессе рекристаллизации определяется размером зерна и, следовательно, зависит

от степени предшествующей деформации, времени выдержки и температуры рекристаллизации. Остаточные напряжения связаны с пределом текучести, который зависит от диаметра субзёрен по соотношению Холла – Петча [5]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d_{cp}^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение Пайерлса, МПа;

$k$  – коэффициент Петча;

$d_{cp}$  – средний размер субзерна, Å.

Напряжение Пайерлса рассчитывается по формуле:

$$s_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot G,$$

где  $G$  – модуль сдвига, МПа.

Коэффициент Петча рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{1,6 \cdot G \sqrt{b\Theta}}{2\pi \cdot (1-\nu)},$$

где  $b$  – модуль вектора Бюргерса, Å;

$\Theta$  – угол разориентировки соседних субзёрен, рад;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Размер зерна влияет преимущественно на изменение остаточных напряжений I и II рода. Величиной напряжений III рода можно пренебречь, так как рекристаллизационный отжиг приводит к зарождению и росту новых зёрен с меньшим количеством дефектов строения:

$$ds_{I\text{ ПЕК}} + ds_{II\text{ ПЕК}} = ds_T. \quad (8)$$

Так как для большинства сплавов оптимальная температура, скорость нагрева и охлаждения определены на практике и при назначении режима рекристаллизационного отжига остаются постоянными, то можно считать, что размер зерна при рекристаллизации является функцией от степени деформации и температуры рекристаллизации. В общем случае характер зависимости величины рекристаллизованного зерна от степени предшествующей деформации и температуры на-

грева описывается диаграммой рекристаллизации. Поскольку порог рекристаллизации и, следовательно, температура рекристаллизационного отжига являются многофакторным критерием (зависит от природы сплава, химического состава, чистоты металла, формы заготовки и т.п.), то практически для каждого из выбранных сплавов  $T_p$  является определённой величиной. В связи с этим рассматривается изменение величины рекристаллизованного зерна только в зависимости от степени предшествующей холодной деформации:

$$d_{cp} = f(e_i), \quad (9)$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр субзерна, Å;  $e_i$  – степень предшествующей деформации.

Подставляя (9) в (7), получим выражение для определения предела текучести в зависимости от размера зерна:

$$s_T = s_0 + k \cdot f(e_i)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Дифференцируя выражение (10), находим:

$$ds_T = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot f(e_i)^{-\frac{3}{2}} \cdot f'(e_i) \cdot de_i. \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (8), получим уравнение для расчёта изменения остаточных напряжений после проведения рекристаллизационного отжига:

$$ds_{I\text{ ПЕК}} + ds_{II\text{ ПЕК}} = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot f(e_i)^{-\frac{3}{2}} \cdot f'(e_i) \cdot de_i. \quad (12)$$

Интегрируя выражение (12), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига:

$$s_{I\text{ ПЕК}} + s_{II\text{ ПЕК}} = k \cdot F_2(e_i)^{\frac{1}{2}} + C_2, \quad (13)$$

где  $F_2(\varepsilon_i)$  – первообразная функциональной зависимости размера зерна после рек-

ристаллизации от степени предшествующей деформации.

При условии  $\varepsilon=0$ ,  $\sigma_{I ПД} + \sigma_{II ПД}=0$  получаем:

$$C_2 = -k \cdot F_0^{\frac{1}{2}},$$

$$S_{I ПЕК} + S_{II ПЕК} = k \cdot F_2(e_i)^{\frac{1}{2}} - k \cdot F_0^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Основными факторами, от которых зависят свойства и характер структурных изменений конкретных сплавов при старении, являются температура нагрева под закалку, скорость охлаждения, температура повторных нагревов и время выдержки  $\tau$ . Структурные изменения, протекающие при старении, влияют на формирование напряжений II и III рода, т.к. протекают в пределах зёрен (субзёрен) и связаны с изменением искажённости кристаллической решётки. Для определения остаточных напряжений, формирующихся в процессе старения, получено выражение:

$$ds_{IICT} + ds_{IIICT} = ds_i, \quad (15)$$

где  $s_i = f(T, t)$ .

Наиболее полно характер зависимости прочностных свойств от температуры и времени выдержки описывают кривые изменения прочности в зависимости от продолжительности старения при различных температурах (рис. 1).

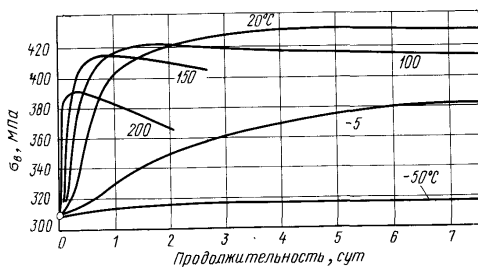


Рис. 1. Кривые изменения прочности сплава Д16 в зависимости от температуры старения [6]

Дифференцируя выражения для  $\sigma_i$  по времени выдержки и температуре старения, получаем выражение:

$$ds_{IICT} + ds_{IIICT} = \frac{\partial s_i}{\partial t} dt + \frac{\partial s_i}{\partial T} dT. \quad (16)$$

Так как для каждого сплава в конкретном случае оптимальная температура старения выбирается исходя из требований заказчика по механическим свойствам, то для установления функциональной зависимости  $\sigma_i$  от температуры рассматриваем старение при температуре  $T_0 = \text{const}$ .

При  $T_0 = \text{const}$  получаем:

$$d\sigma_{IICT} + d\sigma_{IIICT} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau} d\tau, \quad (17)$$

где  $\sigma_i = f(T_0, \tau)$ .

Дифференцируя выражение для  $\sigma_i$ , получаем:

$$ds_{IICT} + ds_{IIICT} = f'(T_0, t) dt. \quad (18)$$

Интегрируя (18), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений:

$$\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = F_3(T_0, \tau) + C_3,$$

где  $F_3(T_0, \tau)$  — первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения времени выдержки старения при постоянной температуре.

При условии  $\tau = 0$  и  $\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = 0$  получаем  $C_3 = 0$ :

$$s_{IICT} + s_{IIICT} = F_3(T_0, t). \quad (19)$$

При  $\tau_0 = \text{const}$  получаем

$$ds_{IICT} + ds_{IIICT} = \frac{\partial s_i}{\partial T} dT, \quad (20)$$

где  $\sigma_i = f(T, \tau_0)$ .

Дифференцируя выражение для  $\sigma_i$ , получаем:

$$ds_{IICT} + ds_{IIICT} = f'(T, t_0) dT. \quad (21)$$

Интегрируя (21), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений:

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_4(T, t_0) + C_4, \quad (22)$$

где  $F_4(T_0, \tau)$  – первообразная функциональной зависимости изменения напряжений от изменения температуры старения при постоянном времени выдержки.

При условии  $T=0^0C$  и  $\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = 0$  получаем  $C_4 = 0$ :

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_4(T, t_0). \quad (23)$$

Из выражений (19) и (23) получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений после старения:

$$S_{IICT} + S_{IIICT} = F_3(T_0, t) + F_4(T, t_0). \quad (24)$$

Поскольку результирующие напряжения для алюминиевого сплава будут складываться последовательно из всех остаточных напряжений, возникающих за счёт каждой операции, то конечный их уровень будет определяться векторной суммой остаточных напряжений, сформированных при проведении пластической деформации, рекристаллизации и старении:

$$\begin{cases} \sigma_I = \sigma_{IПД} + \sigma_{IРЕК} + \sigma_{ICT}, \\ \sigma_{II} = \sigma_{IIПД} + \sigma_{IIРЕК} + \sigma_{IICT}, \\ \sigma_{III} = \sigma_{IIIПД} + \sigma_{IIIРЕК} + \sigma_{IIICT}. \end{cases} \quad (25)$$

Расчёт остаточных напряжений по полученным зависимостям (25) не вполне

корректен, так как разделение напряжений по роду в процессе каждой операции является условным.

В качестве результирующих остаточных напряжений необходимо рассматривать совокупность остаточных напряжений, возникающих под воздействием отдельных факторов. В статье в качестве таких факторов рассматривается пластическая деформация, рекристаллизация и старение. Объединив уравнения (6), (14), (24), находим остаточные напряжения, сформировавшиеся в детали в процессе её изготовления:

$$\begin{cases} \sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = F_1(\epsilon_i), \\ \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} = k \cdot F_2(\epsilon_i)^{\frac{1}{2}} - k \cdot F_0^{\frac{1}{2}}, \\ \sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = F_3(T_0, \tau) + F_4(T, \tau_0). \end{cases} \quad (26)$$

Для проверки сходимости математической модели были подобраны функциональные зависимости для сплавов АМг10 и Д16 и проведены их сравнения с экспериментальными и расчётными значениями.

Для определения функциональных зависимостей напряжений от степени пластической деформации рассмотрим диаграмму упрочнения, полученную по результатам статических испытаний на растяжение (рис. 2 и 3) по методике [4].

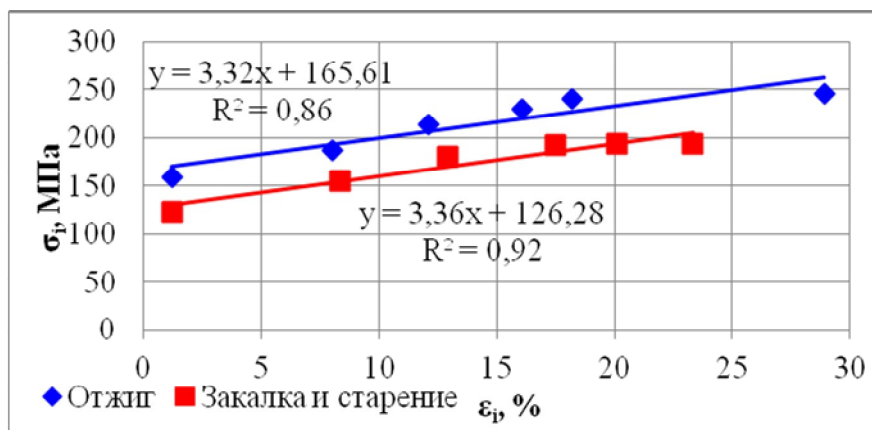


Рис. 2. Кривая упрочнения сплава АМг10

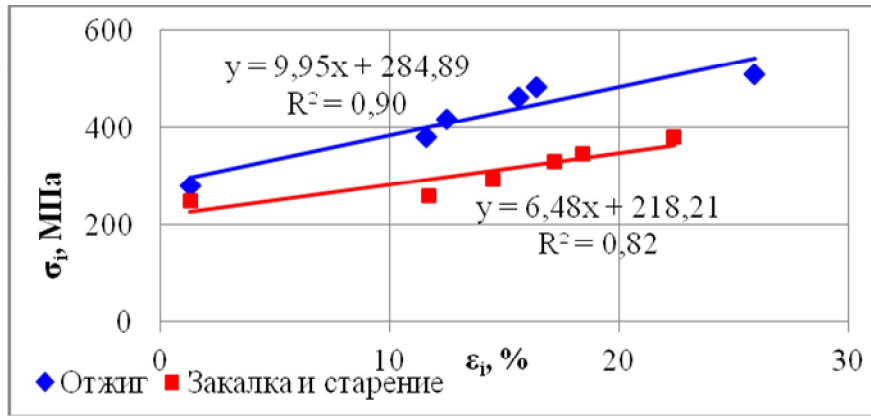


Рис. 3. Кривая упрочнения сплава Д16

Для экспериментальных значений  $\sigma_i(\varepsilon_i)$  были подобраны аппроксимирующие зависимости, которые имеют линейный характер для исследуемого диапазона  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  с максимальной величиной достоверности аппроксимации  $R^2$ .

Из рис. 2 и 3 видно, что кривая упрочнения для сплавов АМг10 и Д16 описывается линейным уравнением

$$\sigma_i = a_1 \cdot \varepsilon_i + b_1. \quad (27)$$

Дифференцируя (27), получим

$$d\sigma_i = a_1 \cdot d\varepsilon_i. \quad (28)$$

Интегрируя выражение (28), находим первообразную функциональной за-

висимости напряжений от степени деформации:

$$F_1 = a_1 \cdot e_i. \quad (29)$$

Подставляя выражение (29) в уравнение (6), получим уравнение для расчёта остаточных напряжений после пластической деформации для сплавов АМг10 и Д16:

$$s_{I\text{плд}} + s_{II\text{плд}} = a_1 \cdot e_i. \quad (30)$$

Для получения функциональной зависимости напряжений после проведения рекристаллизации рассмотрено изменение рекристаллизованного зерна от степени предшествующей деформации (рис. 4, 5).

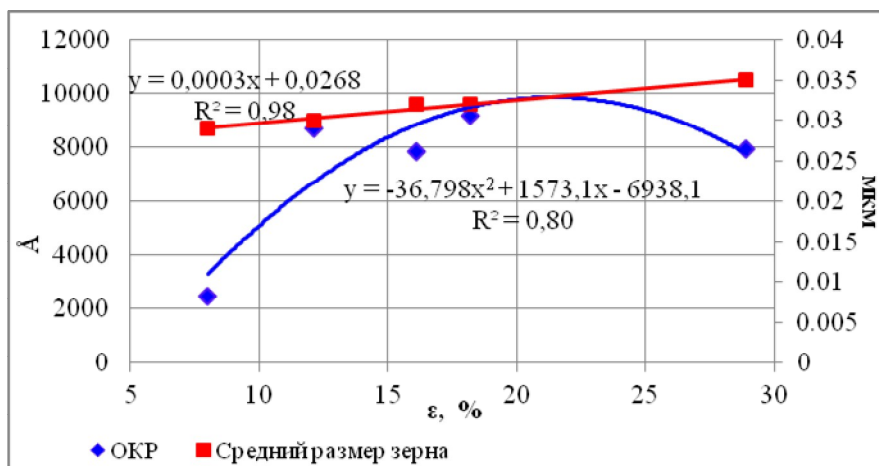


Рис. 4. Изменение размеров кристаллитов для сплава АМг10 в отожжённом состоянии

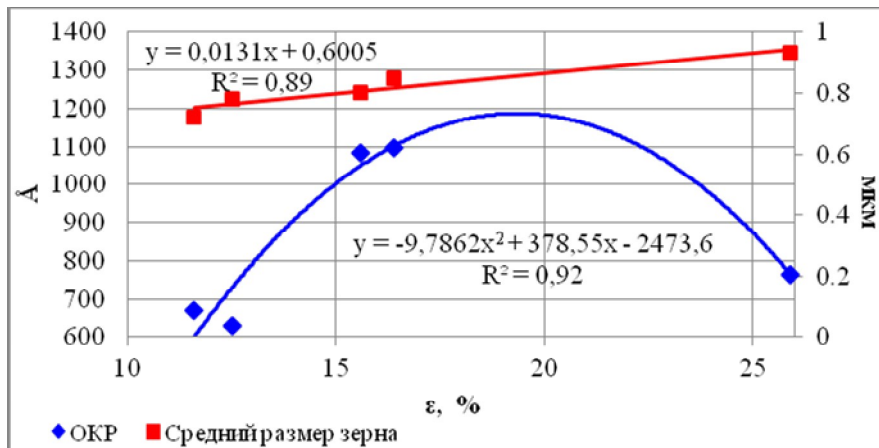


Рис. 5. Изменение размеров кристаллитов для сплава Д16 в отожжённом состоянии

Анализ полученных данных показал, что зависимость размера зерна от степени деформации можно описать квадратичной функцией:

$$d_{cp} = f(\epsilon_i) = a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i + c_2, \quad (31)$$

где  $d_{cp}$  - средний диаметр субзерна,  $\text{Å}$ ;  $\epsilon_i$  - степень предшествующей деформации.

Дифференцируя выражение (31), находим  $dd_{cp}$ :

$$dd_{cp} = (2a_2 \cdot \epsilon + b_2) \cdot d\epsilon. \quad (32)$$

Интегрируя выражение (32), находим первообразную функциональной зависимости размера зерна после рекристаллизации в зависимости от степени предшествующей деформации:

$$F_2(\epsilon_i) = a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i. \quad (33)$$

При условии  $\epsilon_i=0$  получаем  $F_0=0$ .

Подставляя (33) в (14), находим уравнение для расчёта остаточных напряжений после проведения рекристаллизационного отжига:

$$\sigma_{I\text{PEK}} + \sigma_{II\text{PEK}} = k \cdot (a_2 \cdot \epsilon_i^2 + b_2 \cdot \epsilon_i)^{\frac{1}{2}}. \quad (34)$$

Для установления зависимостей изменения  $\sigma_i$  от температуры и времени выдержки при старении необходимо построить графики  $s_i = f(T_0, t)$  и  $s_i = f(T, t_0)$ .

В качестве примера в данной работе для сплава АМг10 рассмотрено старение при температуре  $T_0=170^\circ\text{C}$  (рис. 6), а для сплава Д16 – при  $T_0=200^\circ\text{C}$  (рис. 7).

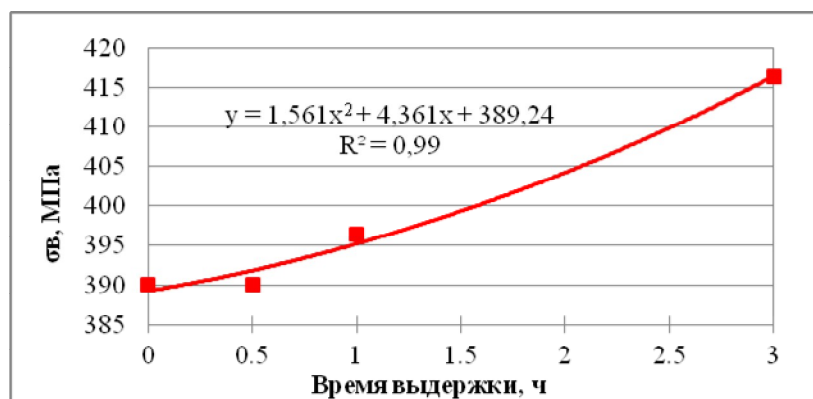


Рис. 6. Изменение прочности сплава АМг10 при  $T=170^\circ\text{C}$

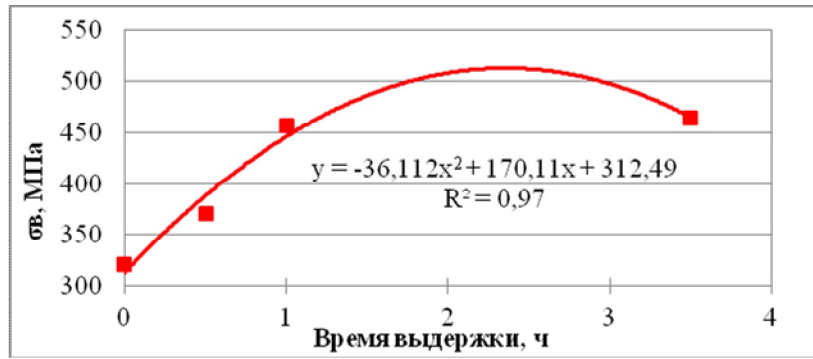


Рис.7. Изменение прочности в сплаве Д16 при  $T=200^{\circ}C$

Эти кривые могут быть описаны при помощи квадратичной функции

$$\sigma_i = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + c_3. \quad (35)$$

Дифференцируя выражение (35), находим выражение для  $d\sigma_i(T_0, \tau)$ :

$$d\sigma_i(T_0, \tau) = (2a_3 \cdot \tau + b_3) \cdot d\tau. \quad (36)$$

Интегрируя выражение (36), находим уравнение для первообразной функциональной зависимости изменения на-

пряжений от изменения времени выдержки при постоянной температуре:

$$F_3(T_0, \tau) = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau. \quad (37)$$

Время выдержки при старении зависит от фазового состава сплава, поэтому в данной работе для листовых заготовок из сплавов АМг10 и Д16 рассматриваем изменение  $\sigma_i$  от температуры старения при времени выдержки  $\tau_0=3$  ч для сплава АМг10 и  $\tau_0=3,5$  ч для сплава Д16 (рис. 8 и 9).

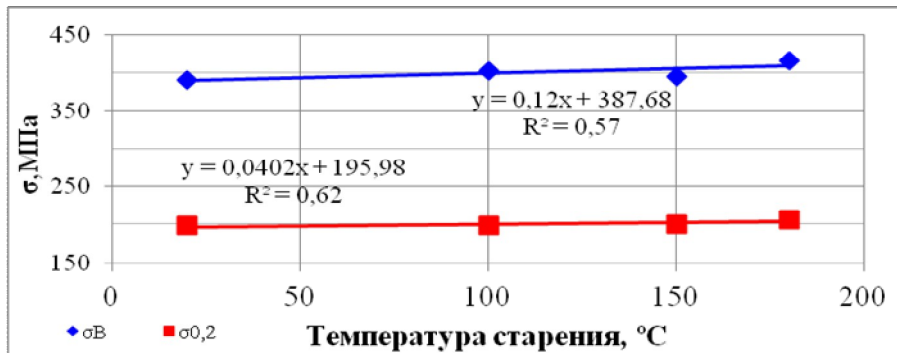


Рис. 8. Изменение прочностных характеристик сплава АМг10 в зависимости от температуры старения

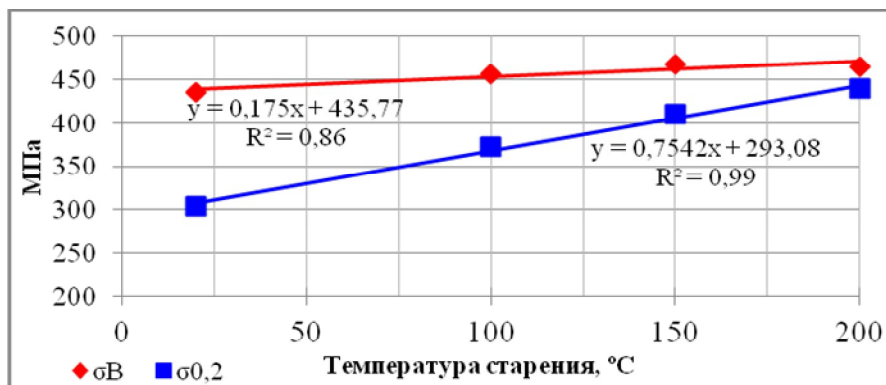


Рис. 9. Изменение прочностных характеристик сплава Д16 в зависимости от температуры старения

Полученные зависимости описываются линейными уравнениями:

$$\sigma_i = a_4 \cdot T + b_4. \quad (38)$$

Дифференцируя полученное выражение (38), находим выражение для  $d\sigma_i(T, \tau_0)$ :

$$d\sigma_i(T, t_0) = a_4 \cdot dT. \quad (39)$$

Интегрируя выражение (39), находим уравнение для определения первообразной функциональной зависимости изменения напряжений от изменения температуры старения при постоянном времени выдержки:

$$F_4(T, t_0) = a_4 \cdot T. \quad (40)$$

Подставляя выражения (37) и (40) в уравнение (24), получаем уравнение для расчёта остаточных напряжений после старения:

$$\sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + a_4 \cdot T. \quad (41)$$

Подставляя полученные уравнения (30), (34) и (41) в систему уравнений (26), находим уравнения для расчёта остаточных напряжений, сформировавшихся в детали при её изготовлении для сплавов АМг10 и Д16:

$$\begin{cases} \sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = a_1 \cdot \varepsilon_i, \\ \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} = k \cdot (a_2 \cdot \varepsilon_i^2 + b_2 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}, \\ \sigma_{IICT} + \sigma_{IIICT} = a_3 \cdot \tau^2 + b_3 \cdot \tau + a_4 \cdot T. \end{cases} \quad (42)$$

Анализ полученных зависимостей показал, что увеличение степени пластической деформации приводит к росту остаточных напряжений. При рекристаллизационном отжиге увеличение степени

предшествующей деформации приводит к снижению уровня остаточных напряжений, что объясняется динамической рекристаллизацией. Проведение закалки с последующим старением способствует увеличению уровня остаточных напряжений в металле.

Расчётные остаточные напряжения после пластической деформации для сплава АМг10 и Д16 находим соответственно по уравнениям:

для сплава АМг10

$$\sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = 3,32 \cdot \varepsilon_i, \quad (43)$$

для сплава Д16

$$\sigma_{IПД} + \sigma_{IIПД} = 6,48 \cdot \varepsilon_i. \quad (44)$$

Расчётные и экспериментальные значения остаточных напряжений после пластической деформации приведены на рис. 10 и 11.

Остаточные напряжения после проведения рекристаллизации находим по уравнениям:

для сплава АМг10

$$\begin{aligned} \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} &= \\ &= 3,142 \cdot 10^3 (-36,798 \cdot \varepsilon_i^2 + 1573,1 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (45)$$

для сплава Д16:

$$\begin{aligned} \sigma_{IРЕК} + \sigma_{IIРЕК} &= \\ &= 3,147 \cdot 10^3 (-9,7862 \cdot \varepsilon_i^2 + 378,55 \cdot \varepsilon_i)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (46)$$

Расчётные и экспериментальные значения остаточных напряжений после рекристаллизации приведены на рис. 12 и 13.



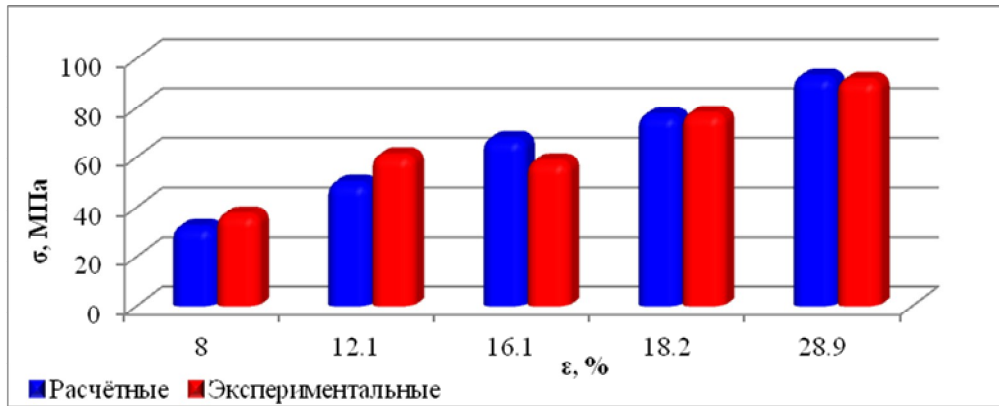


Рис. 10. Изменение остаточных напряжений от действия пластической деформации в сплаве АМг10

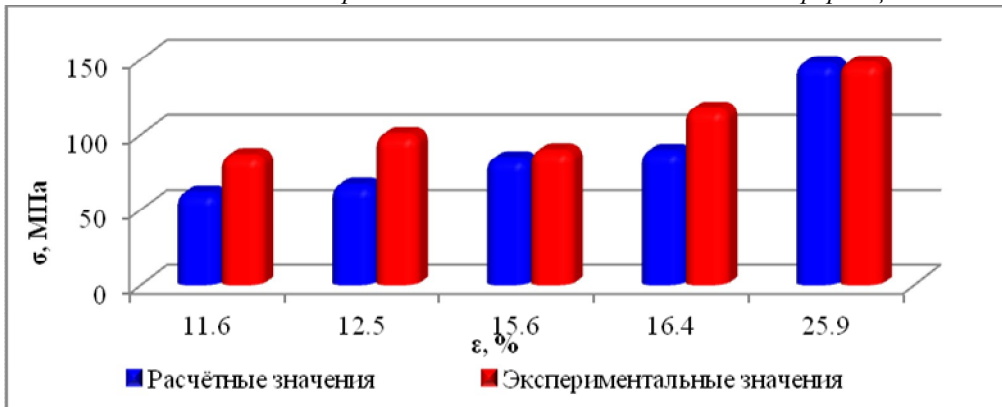


Рис. 11. Изменение остаточных напряжений от действия пластической деформации в сплаве Д16

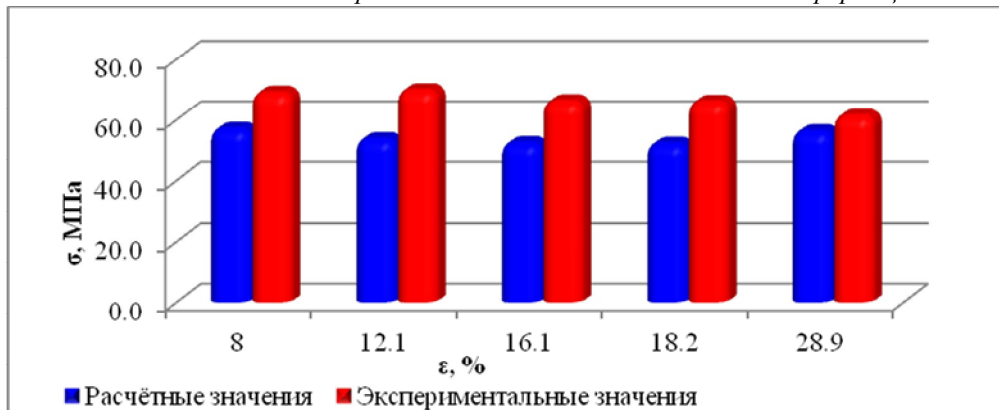


Рис. 12. Изменение остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига для сплава АМг10

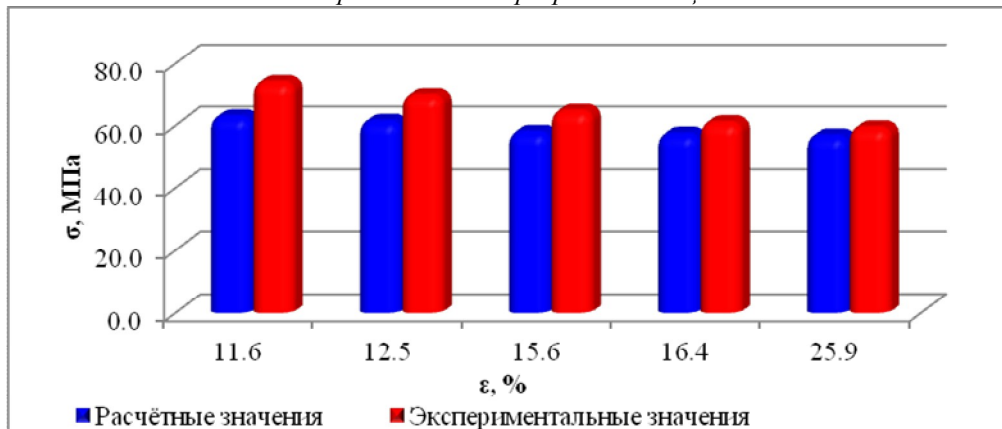


Рис. 13. Изменение остаточных напряжений после рекристаллизационного отжига в сплаве Д16

Остаточные напряжения после проведения старения находим по выражениям:

для сплава АМг10

$$\sigma_{\text{пст}} + \sigma_{\text{шст}} = 1,561 \cdot \tau^2 + 4,361 \cdot \tau + 0,120 \cdot T, \quad (47)$$

для сплава Д16

$$\sigma_{\text{пст}} + \sigma_{\text{шст}} = -36,112 \cdot \tau^2 + 170,11 \cdot \tau + 0,193 \cdot T. \quad (48)$$

Расчётные и экспериментальные данные определены для максимальной степени деформации и представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения расчётных и экспериментальных остаточных напряжений после закалки и старения

Сплав	Температура старения, время выдержки	Расчётные значения, $\sigma_{\text{пст}} + \sigma_{\text{шст}}$ , МПа	Экспериментальные значения, $\sigma_{\text{пст}} + \sigma_{\text{шст}}$ , МПа
АМг10	$T=170^{\circ}\text{C}$ , $\tau=3,0$ ч	84,805	80,020
Д16	$T=200^{\circ}\text{C}$ , $\tau=3,5$ ч	82,79	108,52

Проверка сходимости математической модели показала, что расхождение расчётных данных с экспериментальными данными составляет не более 26% в зависимости от сплава и режимов термической обработки и пластического деформирования. Такое расхождение можно объяснить неточностью аппроксимации полученных функциональных зависимостей, а также имеющейся погрешностью измерений при проведении экспериментов.

### Библиографический список

1. Горелик, С. С. Рентгенографический и электрооптический анализ [Текст]: практическое руководство / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. - М.: Металлургия, 1970. - 366 с.
2. Пат. №96113996 Российская Федерация, МПК В22Д11/04. Способ литья алюминиевых сплавов, алюминиевый сплав и способ производства из него про-

межуточных изделий [Текст] / В. М. Живодёров, А. М. Бибииков, А. Л. Илоземцев; заявитель и патентообладатель Живодёров Виктор Макарьевич. - №96113996/02; заявл. 24.07.1996; опубл. 27.05.1998.

3. ГОСТ 4784-74. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки [Текст] / Введ. 1974. - М.: Изд-во стандартов, 1974. - 32 с.

4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст] / Введ. 1984-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 25 с.

5. Дубарев, Е. Ф. Микроскопическая деформация и предел текучести поликристаллов [Текст] / Е. Ф. Дубарев. - Томск: Изд-во Томского ун-та, 1988. - 256 с.

6. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. - М.: МИСиС, 1999. - 416 с.

## THE INFLUENCE OF THE HEAT PROCESSING AND PLASTIC DEFORMATION MODES ON THE FORMATION OF THE ALUMINUM ALLOYS STRUCTURE

© 2012 O. G. Savelyeva

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

A link between structural indicators and mechanical properties of aluminum alloys AMg10 and D16 has been established. Factors are proposed that depend on changing the structure and are directly relate to mechanical and technological properties. The influence of the parameters of the plastic deformation mode, recrystallization annealing, as well as ageing on the formation of residual stresses of the I, II, and III rind has been analysed.

*Mechanical properties, residual stresses, structural indicators, recrystallization annealing, ageing, plastic deformation.*

### Информация об авторе

**Савельева Оксана Григорьевна**, аспирант кафедры обработки металлов давлением, инженер управления инновационных программ, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [diop@ssau.ru](mailto:diop@ssau.ru). Область научных интересов: металлосплавление легких сплавов.

**Savelyeva Oksana Grigoryevna**, post graduate student of the plastic metal working department, engineer of the innovation programs board, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area research: light alloys engineering.

УДК 535.42

**ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ МИКРОАКСИКОНА**© 2012 С. А. Дегтярев<sup>1</sup>, С. Н. Хонина<sup>2</sup><sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН

На основе разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка за счёт внесения в пучок вихревой фазовой зависимости.

*Острая фокусировка, микроаксикон, линейная поляризация, вихревой пучок, преодоление дифракционного предела.*

Известно, что аксикон формирует бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности равен  $\text{FWHM} = 0,36\lambda$  [1, 2], что на 30% меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой. Таким образом, вполне естественно использование аксикона в сверхразрешающих изображающих системах и для уплотнённой записи данных [3-5].

Однако при линейной поляризации излучения (которое производится большинством лазеров), освещающего аксикон, достижению сверхразрешения в суммарной интенсивности электромагнитного поля препятствует вклад продольного компонента, усиливающийся при увеличении числовой апертуры и уширяющий поперечный размер светового пятна вдоль оси поляризации. Поэтому во многих работах рассматривается радиально-поляризованный падающий пучок. При радиальной поляризации высокоапертурный аксикон формирует световое пятно, состоящее в основном из одного продольного компонента, и позволяет достичь предсказанное скалярной теорией сверхразрешение по сравнению с линзой [3-7]. Данная ситуация особенно полезна при использовании материалов, чувстви-

тельных только к продольному компоненту [8].

В работах [9-12] было показано, что для линейно-поляризованного излучения, падающего на бинарный аксикон с высокой числовой апертурой, можно уменьшить размер центрального светового пятна вдоль линии поляризации с помощью линейного фазового скачка, перпендикулярного оси поляризации, или введения вихревой фазы.

Этот эффект был обнаружен для дифракционного аксикона в приближении тонкого оптического элемента.

В данной работе рассматривается рефракционный микроаксикон, который может быть изготовлен, например, выращиванием в резисте. Численное моделирование осуществляется с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) [13-17]. Показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка за счёт внесения в пучок вихревой фазовой зависимости.

### 1. Фокусировка гауссового пучка микроаксиконом с различным углом раскрыва

Рассмотрим конический микроаксикон с показателем преломления  $n = 1,5$ , радиусом  $R = 3$  мкм в основании, размещённый в свободном пространстве. Высота аксикона  $h$  будет варьироваться в пределах от 2 до 4 мкм. При распространении лазерного пучка от основания к вершине за счёт внутреннего отражения от стенок аксикона происходит концентрация излучения возле оси симметрии элемента. Таким образом, на острие аксикона происходит фокусировка введённого излучения.

Для моделирования процесса использовался пакет FullWAVE RSoft, реализующий разностное решение уравнений Максвелла в пространственно-временной области (FDTD – метод). Дискретизация по пространственным переменным выполнялась с шагом  $\lambda/20$ , по времени –  $\lambda/(100c)$ , где  $\lambda=1$  мкм – длина волны лазерного излучения,  $c$  – скорость света.

Для оценки фокусирующих свойств аксикона с различным углом раскрыва рассмотрим фокусировку гауссового пучка аксиконом с различной высотой. В качестве начального распределения электрического поля берётся линейно-поляризованная вдоль оси  $x$  фундаментальная мода Гаусса:

$$E_x(r, \mathbf{j}, z = 0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right), \quad (1)$$

где  $(r, \mathbf{j})$  – полярные координаты в плоскости  $z = 0$  (непосредственно в плоскости основания аксикона);  $A$  – нормирующий множитель;  $s = 1,5$  мкм – радиус гауссовского пучка. В работе предполагается взаимное расположение микроаксикона и осей координатной системы, показанное на рис. 1. Начальное распределение электрического поля задаётся в плоскости  $XOY$ . Излучение проходит через микроаксикон вдоль оси  $Z$ . Будем рассматривать распределение интенсивности излучения в двух плоскостях  $X'O'Y'$  и  $X''O''Y''$ , расположенных за аксиконом, как показано на рис. 1.

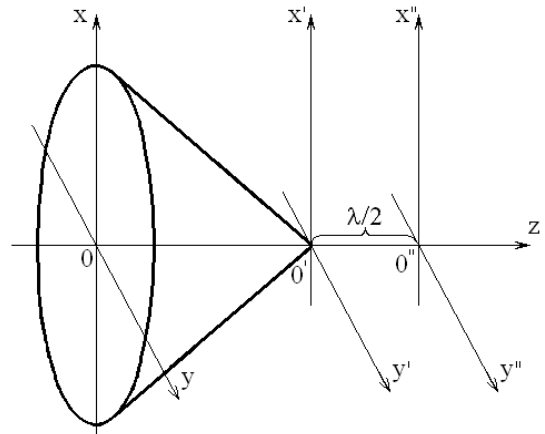


Рис. 1. Микроаксикон в Декартовой системе координат

Для анализа использовались усреднённые по времени значения интенсивности поля в расчётном пространстве. Так как поляризация лазерного излучения линейная, то при острой фокусировке нарушается осевая симметрия распределения поля.

На рис. 2 показаны картины усреднённых по времени продольных и поперечных сечений распределения квадратов модулей напряжённости электрического поля (негатив) для двух компонентов: поперечного  $|E_x(r, \mathbf{j}, z)|^2$ , продольного  $|E_z(r, \mathbf{j}, z)|^2$ , а также для полной интенсивности  $|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$ . Эти картины получены в результате моделирования процесса распространения волн через аксикон радиусом 3 мкм и высотой 2 мкм (угол при вершине  $\alpha = 112,62^\circ$ ). Вид  $y$ -компонента в данном случае не приводится из-за незначительного вклада в общую интенсивность.

Как видно из рисунка, при линейной  $x$ -поляризации освещающего пучка происходит вытягивание фокального пятна вдоль оси поляризации. Особенно это заметно в ближней зоне дифракции. Также в этой зоне является существенным вклад продольного компонента напряжённости электрического поля, которая приводит к формированию структуры в виде двух световых пятен.

На рис. 3 и 4 приведены аналогичные результаты расчёта для аксиконов с

тем же радиусом 3 мкм, но большей высоты: угол при вершине  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 3) и  $\alpha = 73,74^\circ$  (рис. 4). Результаты, представленные на рис. 2...4, показывают, что с увеличением высоты аксикона увеличивается числовая апертура оптического элемента и вклад продольного компонента в общую интенсивность также увеличивается.

Для аксиконов на рис. 2 и 3 угол раскрыва менее критического  $\alpha = 96,38^\circ$

(для показателя преломления  $n=1,5$ ), соответствующего геометрическому полному внутреннему отражению лучей от поверхности аксикона. Однако теория распространения электромагнитных волн предсказывает даже в этом случае проникновение части энергии за границу аксикона в виде затухающих волн. Чем уже становится вершина, тем меньше энергии просачивается в свободное пространство.

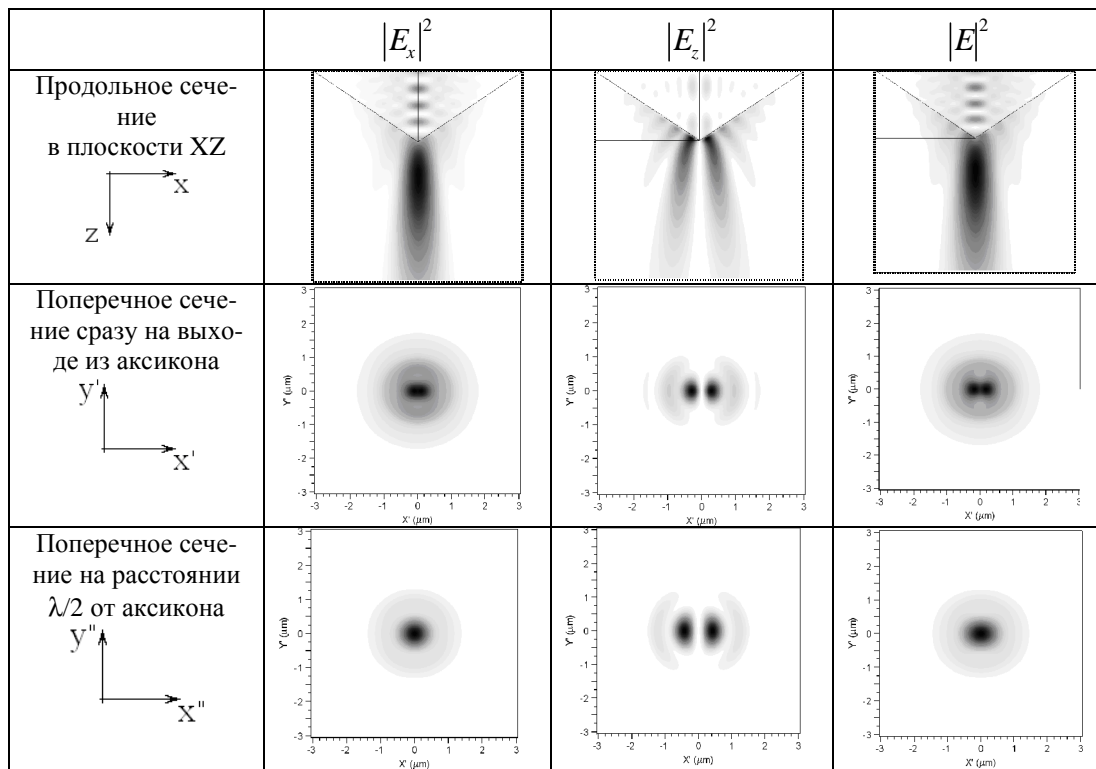


Рис. 2. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 2 мкм

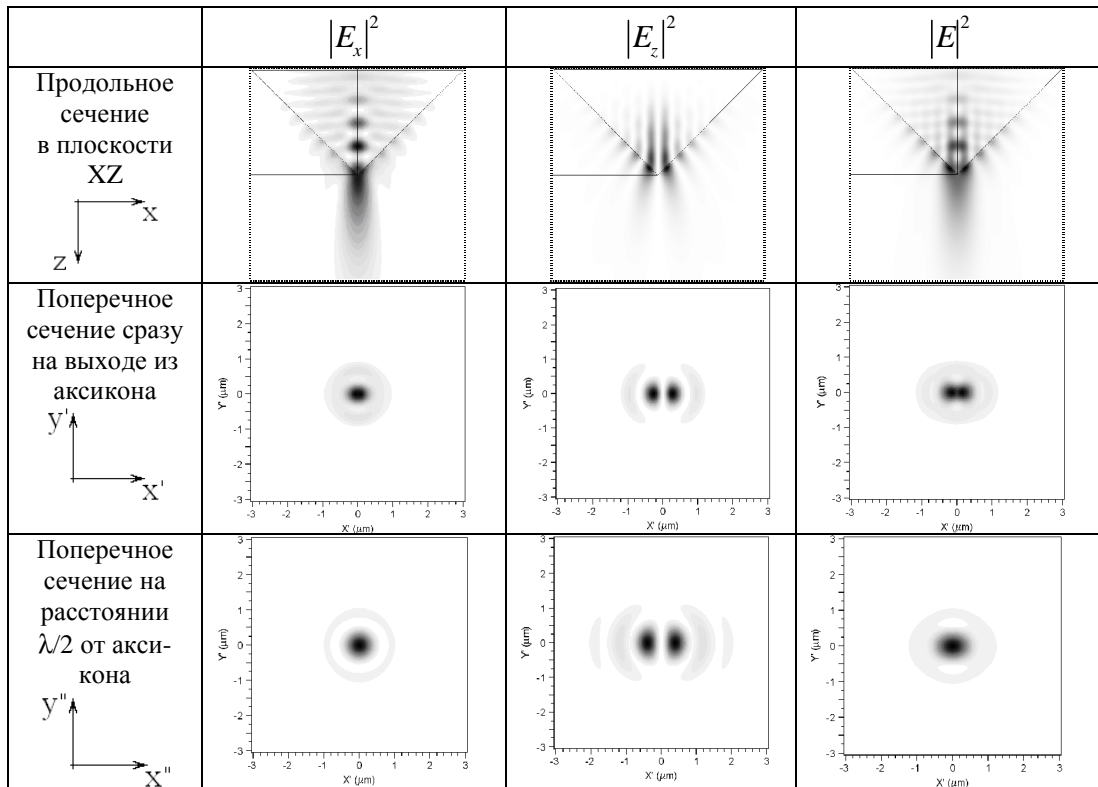


Рис. 3. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 3 мкм

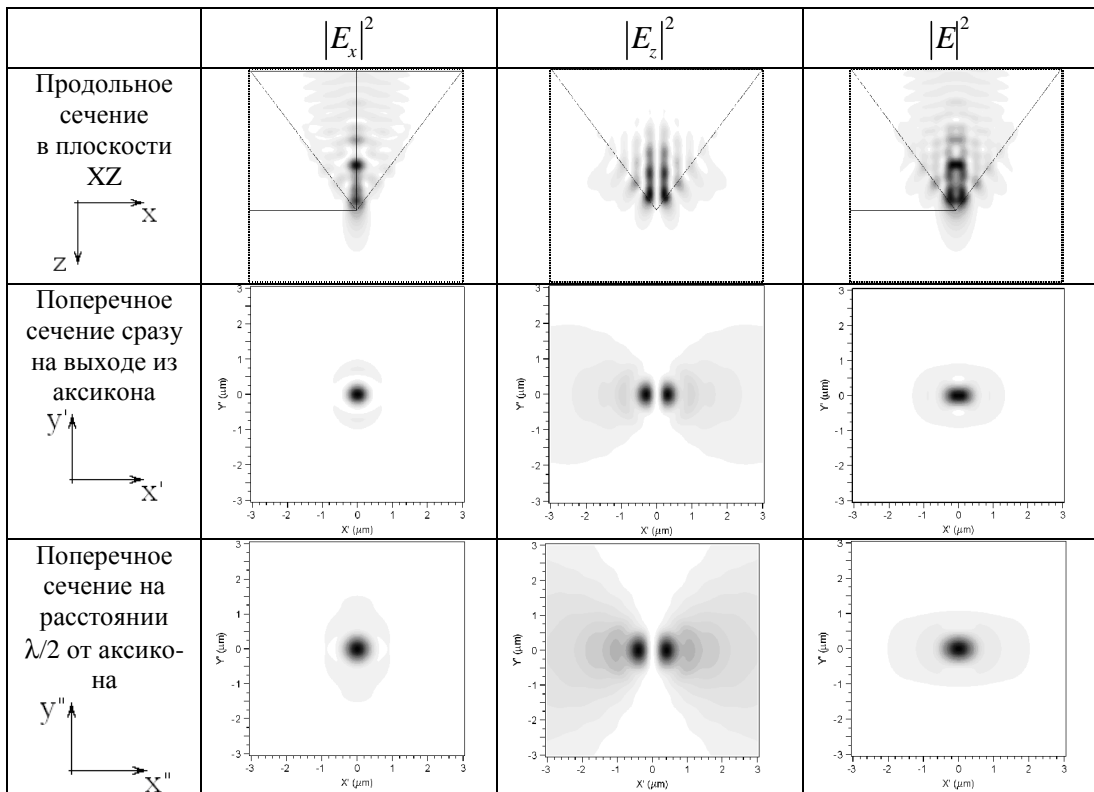


Рис. 4. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 4 мкм

На рис. 5 показано сечение вдоль оси  $x$  фокального пятна на выходе из аксикона с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности (full width at half maximum) вдоль оси  $x$ :  $\text{FWHM}_x=0,83\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $\text{FWHM}_x=0,70\lambda$  для  $a = 90^\circ$  и  $\text{FWHM}_x=0,69\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

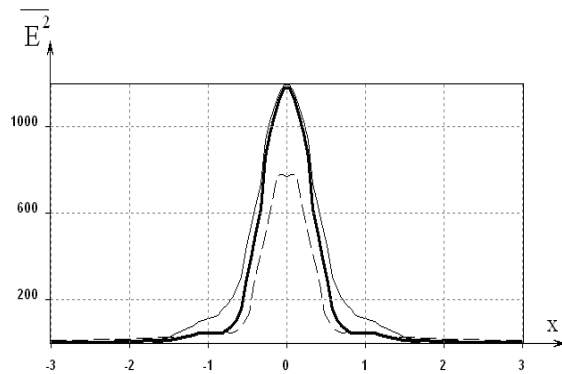


Рис. 5. Сечение фокального пятна вдоль оси  $x$  для аксикона с углом при вершине  $a = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $a = 90^\circ$  (толстая линия) и  $a = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

Как видно из приведённых результатов, мощный вклад продольного компонента приводит к уширению размеров фокального пятна при линейной поляризации. В работах [9-11] было предложено компенсировать это уширение с помощью перпендикулярного оси поляризации ли-

нейного фазового скачка или введения вихревой фазы.

На рис. 6 и 7 приведены результаты расчёта фокусировки освещающего пучка вида

$$E_x(r, j, z=0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \exp(ij) \quad (2)$$

с помощью аксикона с высокой числовой апертурой ( $a = 90^\circ$  на рис. 6 и  $a = 73,74^\circ$  на рис. 7).

Как видно из результатов, приведённых на рис. 6 и 7, при внесении в пучок вихревой фазовой составляющей поперечные компоненты приобретают кольцевую структуру, а продольный компонент представляет собой компактное пятно. Непосредственно на выходе из аксикона вклад продольного компонента очень велик, и он существенно влияет на вид общей интенсивности. Однако на небольшом удалении (полдлины волны) поперечные компоненты снова становятся преобладающими.

На рис. 6 и 7 видно, что из-за особенности в центре вихревого пучка при входе в аксикон формируется яркое световое пятно, связанное с чувствительностью (мощным откликом) продольного компонента на градиент фазы или резкие изменения в структуре оптического элемента [9-12].



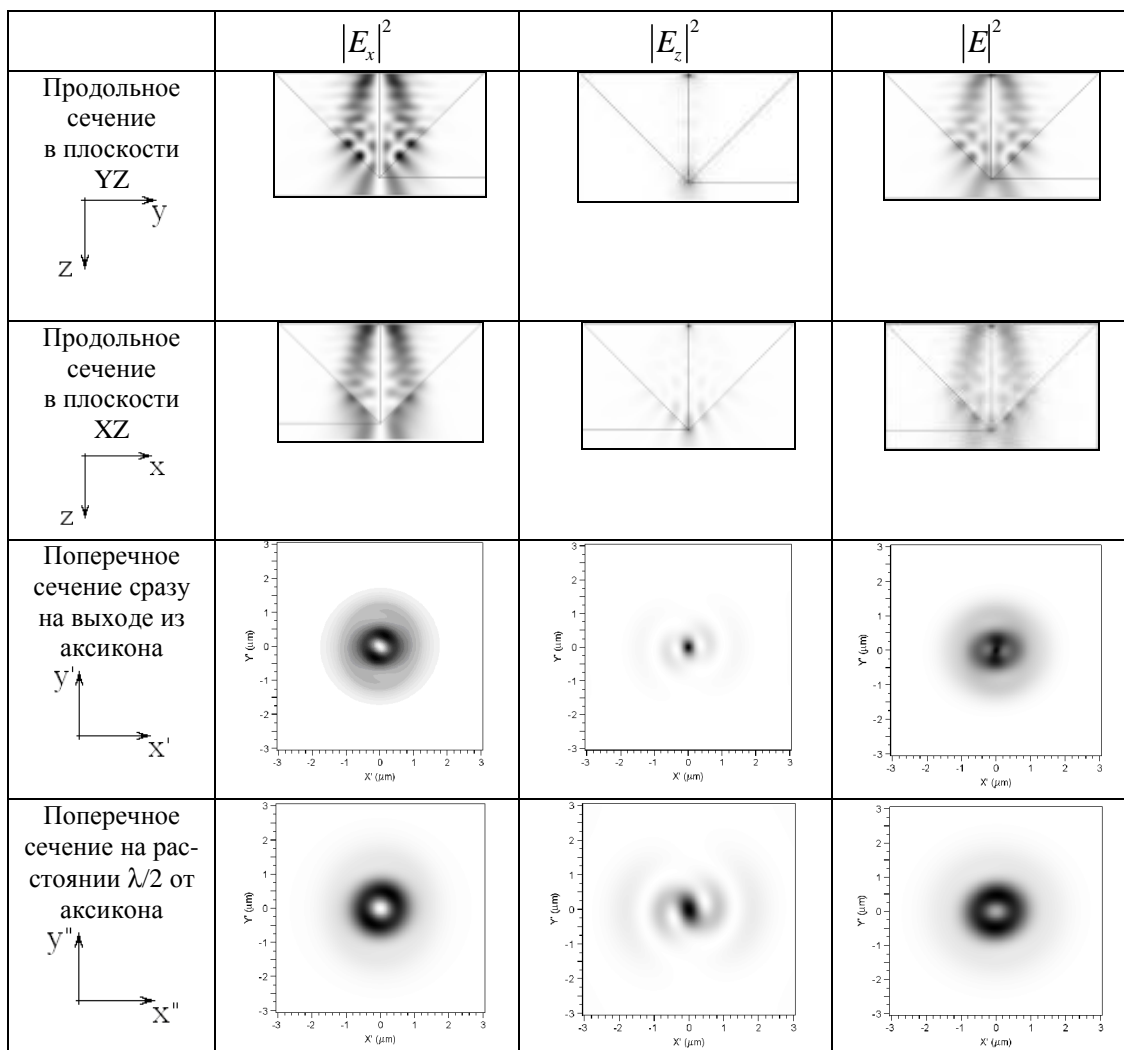


Рис. 6. Фокусировка вихревого Гауссова пучка аксиконом радиусом 3 мкм и  $\alpha = 90^\circ$

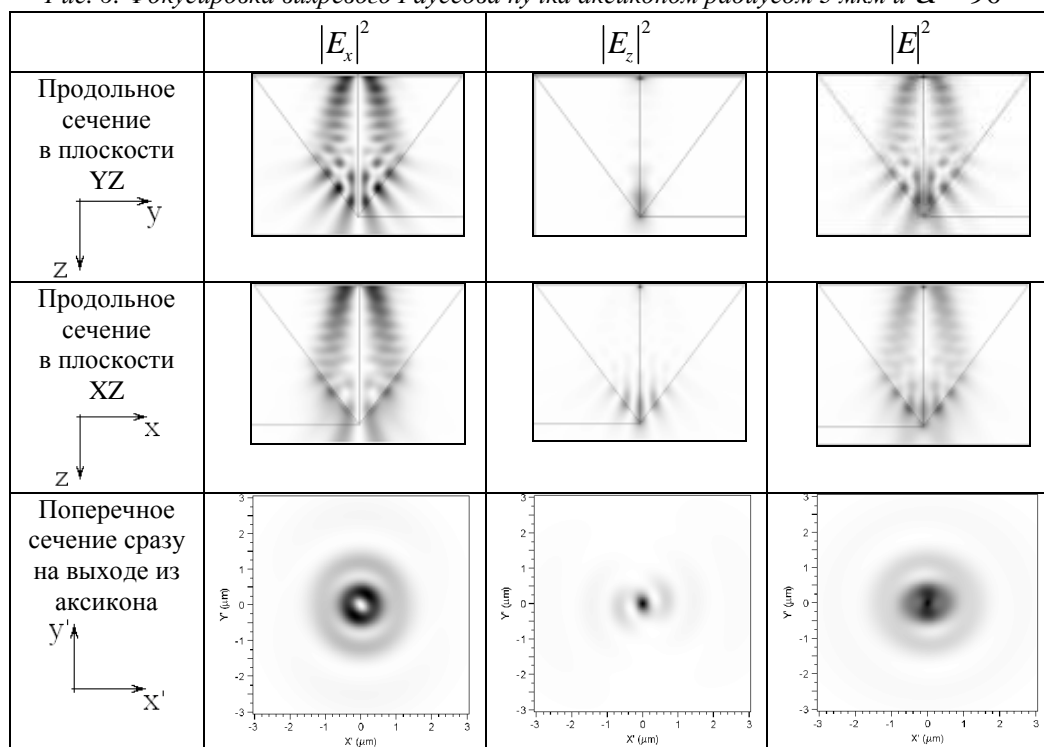


Рис. 7. Фокусировка вихревого Гауссова пучка аксиконом радиусом 3 мкм и  $\alpha = 73,74^\circ$

На рис. 8 показаны сечения вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) фокального пятна на выходе из аксиконов с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности:

$FWHM_x=2,02\lambda$ ,  $FWHM_y=1,79\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $FWHM_x=1,45\lambda$ ,  $FWHM_y=1,13\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$  и  $FWHM_x=1,08\lambda$ ,  $FWHM_y=0,98\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

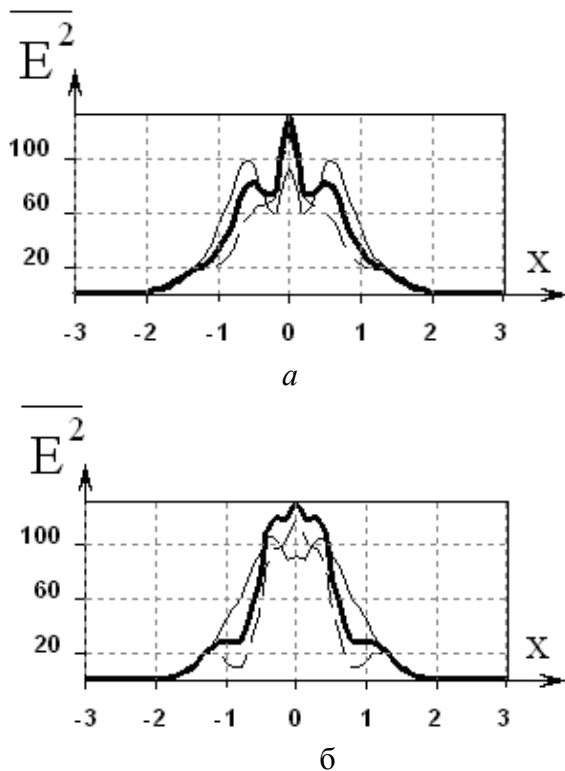


Рис. 8. Сечения фокального пятна вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) при фокусировке вихревого Гауссова пучка аксиконом с углом при вершине  $a = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $a = 90^\circ$  (толстая линия) и  $a = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

На рис. 8 хорошо видно появление острого пика на фоне довольно широкого светового пятна, но, к сожалению, высота этого пика недостаточна для большинства практических применений. Поэтому желательно дополнительно увеличить долю продольного компонента в фокальной области. Это можно сделать, используя вместо вихревого пучка с классической гаус-

совской амплитудой вихревой пучок следующего вида:

$$E_x(r, j, z=0) = A r \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \exp(ij). \quad (3)$$

Умножение на радиальную координату позволяет убрать влияние вихревой особенности в центре пучка (рис. 9).

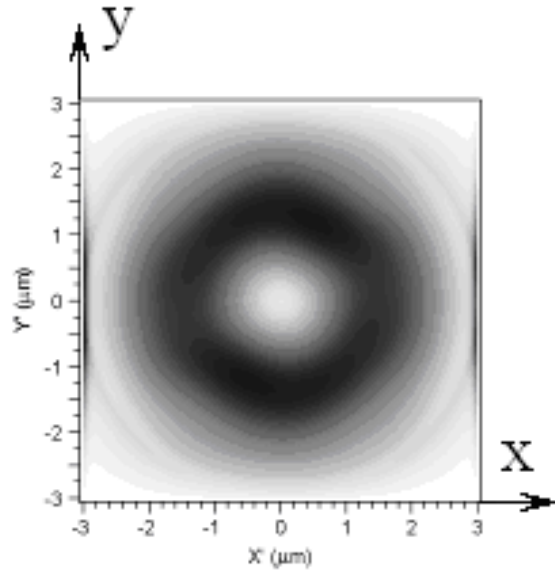


Рис. 9. Вихревой пучок (3) в основании аксикона (негатив)

На рис. 10 и 11 приведены результаты расчёта фокусировки освещающего пучка вида (3) с помощью аксиконов с различным углом раскрыва ( $a = 112,62^\circ$  на рис. 10 и  $a = 90^\circ$  на рис. 11).

На рис. 12 показаны сечения вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) фокального пятна на выходе из аксиконов с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности:

$FWHM_x=0,326\lambda$ ,  $FWHM_y=0,271\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $FWHM_x=0,293\lambda$ ,  $FWHM_y=0,726\lambda$  для  $a = 90^\circ$  и  $FWHM_x=0,313\lambda$ ,  $FWHM_y=0,98\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

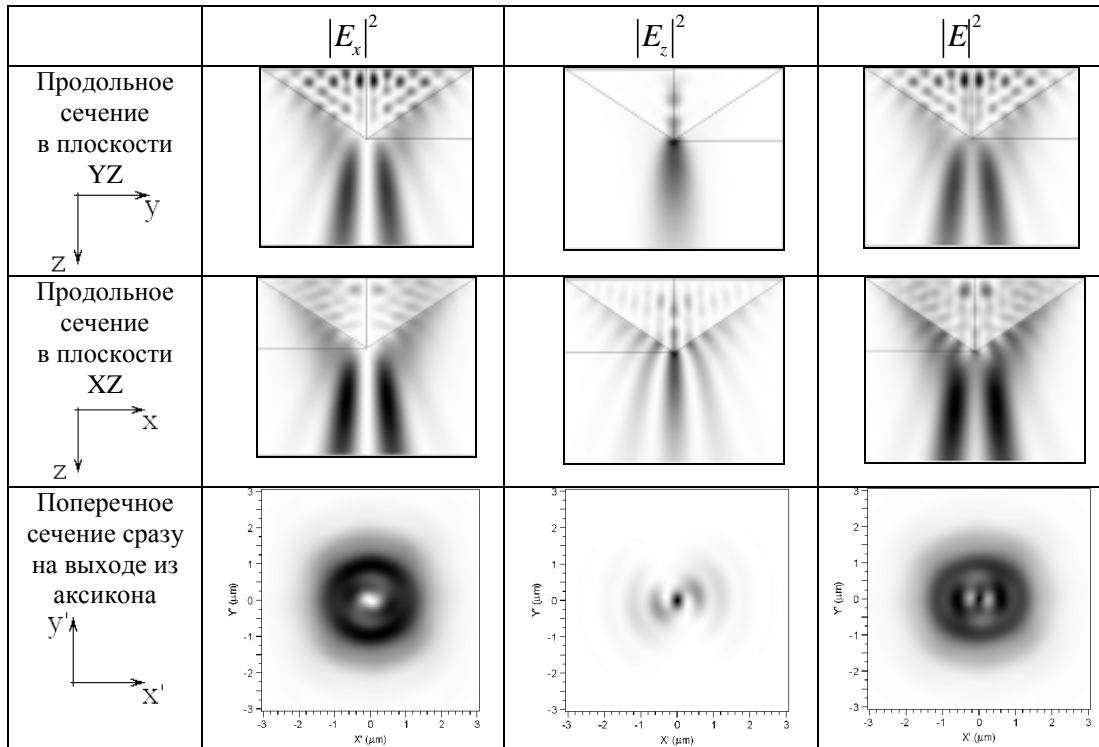


Рис. 10. Фокусировка вихревого пучка (3) аксиконом с  $\alpha = 112,62^\circ$

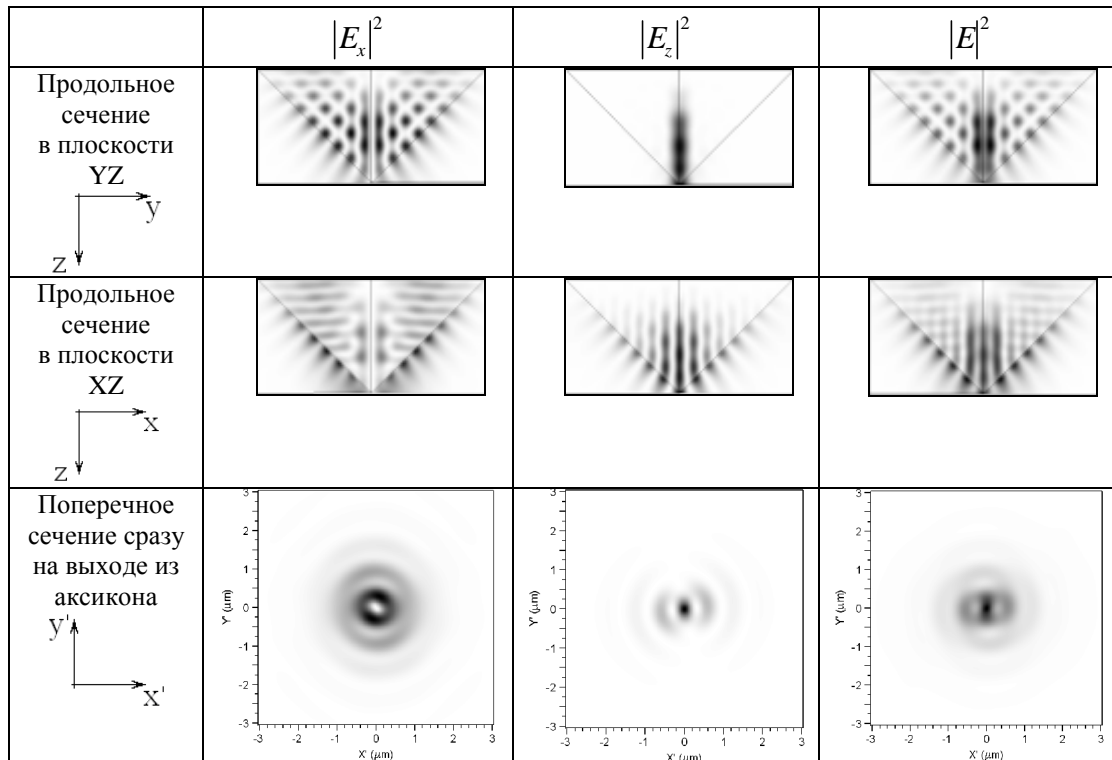


Рис. 11. Фокусировка вихревого пучка (3) аксиконом с  $\alpha = 90^\circ$

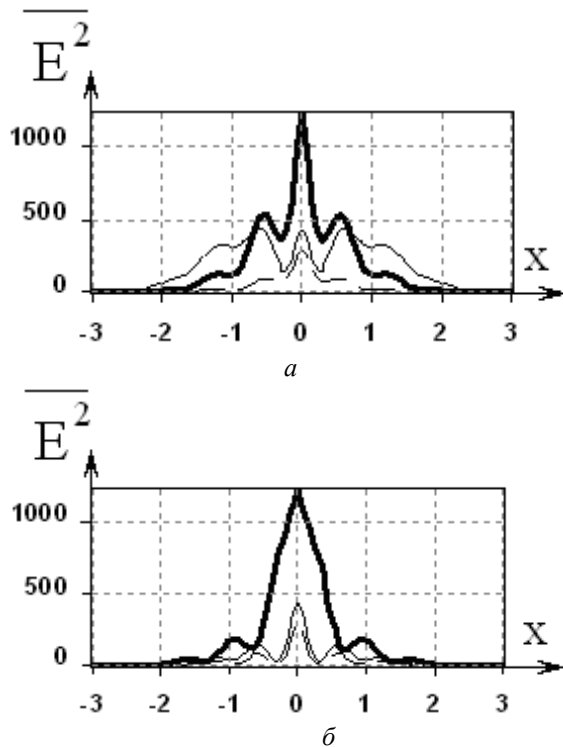


Рис. 12. Сечения фокального пятна вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) при фокусировке вихревого пучка (3) аксиконами с углом при вершине  $\alpha = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $\alpha = 90^\circ$  (толстая линия) и  $\alpha = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

Видно, что высота острого пика интенсивности в центре фокального пятна, изображённого на рис. 12, оказалась значительно больше, чем на рис. 8.

### Заключение

Проведено моделирование фокусировки линейно-поляризованного излучения рефракционным микроаксиконом с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла.

При фокусировке микроаксиконом лазерного Гауссова пучка при линейной  $x$ -поляризации происходит вытягивание фокального пятна вдоль оси поляризации. Особенно это заметно в ближней зоне дифракции и связано с большим вкладом продольного компонента напряжённости электрического поля.

Если на вход аксикона подаётся Гауссов пучок с вихревой фазовой структурой вида (2), у которого в области сингулярности фазы присутствует ненулевая амплитуда, то, несмотря на перераспреде-

ление вклада поперечного и продольного компонентов (т.е. продольный концентрируется в центре, а поперечные располагаются на периферии), в результирующем фокальном пятне мощные поперечные колебания на периферии сводят на нет острую фокусировку продольной составляющей.

Для того, чтобы уменьшить поперечные составляющие в фокальном пятне, предложено использовать вихревой лазерный пучок с кольцеобразной структурой амплитуды вида (3), т.е. в области сингулярности фазы должна быть нулевая амплитуда. При этом основной вклад в энергию фокального пятна вносит остророфокусированная продольная составляющая, что обуславливает острую фокусировку лазерного пучка вида (3) микроаксиконом.

Таким образом, показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка. Для этого достаточно внести в пучок вихревую фазовую зависимость и экранировать область сингулярности фазы (центральной части).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и 11-07-13164-офи-м, а также государственных контрактов 07.514.11.4060, 07.514.11.4055.

### Библиографический список

1. Kalosha, V. P. Toward the sub-diffraction focusing limit of optical super-resolution / V. P. Kalosha and I. Golub // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – P. 3540-3542.
2. Хонина, С. Н. Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С. Н. Хонина, С. Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. - № 4. – С. 401-411.

3. Helseth, L. E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens system // *Opt. Commun.* – 2001. – V. 191. – P. 161-172
4. Zhang, Y. Vector propagation of radially polarized Gaussian beams diffracted by an axicon / Y. Zhang, L. Wang, C. Zheng // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2005. – Vol. 22, No. 11. – P. 2542-2546.
5. Grosjean, T. Conical optics: the solution to confine light / T. Grosjean, F. Baida, and D. Courjon // *APPLIED OPTICS.* – 2007. – Vol. 46, No. 11. – P. 1994-2000.
6. Котляр, В. В. Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксиконов / В. В. Котляр, С. С. Стафеев // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 33. – № 1. – С. 52-60.
7. Хонина, С. Н. Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский, М. А. Ананьин // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2010. – № 12(3). – С. 15-25.
8. Grosjean, T. Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, No. 6. – P. 2203-2210.
9. Хонина, С. Н. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / С. Н. Хонина, С. Г. Волотовский // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 58-68.
10. Хонина, С. Н. Расчёт дифракции линейно-поляризованного ограниченного пучка с постоянной интенсивностью на высокоапертурных бинарных микроаксиконов в ближней зоне / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский, А. А. Ковалёв // *Компьютерная оптика.* 2010. – Т. 34. – № 4. – С. 443-460.
11. Хонина, С. Н. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка на бинарных микроаксиконов с периодом, близким к длине волны / С. Н. Хонина, Д. В. Нестеренко, А. А. Морозов, Р. В. Скиданов, И. А. Пустовой // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35. – № 1. – С. 11-21.
12. Khonina, S. N. Optimization of focusing of linearly polarized light / Khonina S. N. and Golub I. // *Opt. Lett.* 2011. - Vol. 36, No. 3. – P. 352-354.
13. Головашкин, Д. Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Автометрия.* – 2006: Том 42. - № 6. - С. 78-85.
14. Головашкин, Д. Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Двумерный случай / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Автометрия.* – 2007: Том 43. - № 6. - С. 78-88.
15. Головашкин, Д. Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Математическое моделирование.* – 2007. - Том 19. - №2. - С. 48-58.
16. Головашкин, Д. Л. Решение задач компьютерной оптики на графических вычислительных устройствах / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Вестник СГАУ.* – 2010. - № 4 (24). - С. 150-159.
17. Головашкин, Д. Л. Расчёт дифракции на оптическом микрорельефе методом FDTD. / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский, С. А. Малышева // *LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия.* – 2011. - 236 с. ISBN-13: 978-3-8454-0996-2; ISBN-10: 3845409967).

## **SHARP FOCUSING OF A LINEARLY-POLARIZED VORTICAL BEAM BY MEANS OF A MICROAXICON**

© 2012 S. A. Degtyaryov<sup>1</sup>, S. N. Khonina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)  
<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences

The possibility of forming a compact focal spot with the help of a conical microaxicon in case of linear polarization of a lighting beam by introducing vertical phase dependence into the beam is shown on the basis of the difference method of solving Maxwell's equations.

*Sharp focusing, microaxicon, linear polarization, vortical beam, diffraction limit overcoming.*

### **Информация об авторах**

**Дегтярев Сергей Александрович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com). Область научных интересов: сингулярная оптика.

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт систем обработки изображений Российской академии наук. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru). Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

**Degtyaryov Sergei Alexandrovich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com). Area of research: singular optics.

**Khonina Svetlana Nikolaevna**, doctor of science, leading researcher, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru). Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

УДК 517.9

## ВЫЧИСЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ В КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ МАЛОМ МНОГОЗНАЧНОМ ВОЗМУЩЕНИИ

©2012 А. Н. Лепилов

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ–Прогресс», г. Самара

Рассматривается задача определения максимальной амплитуды гармонических колебаний при малом внешнем многозначном воздействии. Для её решения строится усреднённое дифференциальное включение, которое взаимно аппроксимирует исходную систему по медленным переменным на промежутке времени  $[0, 1/m]$ ,  $m$  – малый параметр. Возникает задача вычисления предела максимального среднего для периодической функции, которая решается приближённым методом.

*Колебательная система, предел максимального среднего, дифференциальное включение.*

Рассмотрим колебательную систему, находящуюся под воздействием малой внешней периодической силы с постоянной амплитудой. Исследуем ситуацию, когда фазовый угол внешней силы «плывёт» и известна лишь оценка скорости его изменения. Для этой системы рассмотрим задачу Коши:

$$\begin{cases} \dot{x} + \omega^2 x = mA \cos g, & x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = x_1, \\ \dot{g} \in [w_1, w_2] + mH(t, x, g), & g(0) = y_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega$  – собственная частота колебаний,  $A > 0$  – амплитуда внешней силы,  $m$  – малый параметр,  $0 < \omega_1 < \omega_2$ ,  $H(t, x, \gamma)$  – ограниченное измеримое по  $t$  и липшицево по  $x, \gamma$  многозначное отображение. Решения дифференциального включения  $\dot{g} \in [w_1, w_2]$  рассматриваются в смысле Каратеодори.

Поставим задачу вычисления максимальной амплитуды  $\max_t |x(t)|$  на отрезке  $0 \leq t \leq 1/m$ .

Заменой переменных  $x = a(t) \cos y(t), \quad \dot{x} = -a(t)\omega \sin y(t),$   
 $y(t) = \omega t + q(t)$  переводим исходную задачу (1) к переменным  $a(t), q(t)$  [1]. Получаем

$$\begin{cases} \dot{a} = -m \frac{A}{\omega} \sin y(t) \cos g(t), \\ \dot{q} = -m \frac{A}{a(t)\omega} \cos y(t) \cos g(t), \\ \dot{g} \in [w_1, w_2] + mH(t, a(t) \cos y(t), g(t)), \\ a(0) = a_0, \quad q(0) = q_0, \quad g(0) = y_0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\theta_0 = \arctan(-x_1 / \omega x_0)$ ,  $a_0 = x_0 / \cos q_0$ . Система (2) может быть переписана в виде

$$\begin{cases} \dot{z} = -mF(a(t), q(t), g(t), t) \\ \dot{g} \in [w_1, w_2] + mH(t, a(t) \cos y(t), g(t)), \\ z(0) = z_0, \quad g(0) = y_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $z = (a(t), q(t))$  – медленные,  $t, \gamma(t)$  – быстрые переменные. Рассмотрим эволюцию медленных переменных  $z$  на асимптотически большом промежутке времени  $[0, 1/m]$ ,  $m > 0$ . Сопоставим системе (3) усреднённое дифференциальное включение

$$\dot{\xi} \in mF_0(x), \quad \xi(0) = \xi_0, \quad (4)$$

где  $F_0 : R^2 \rightarrow Kv(R^2)$  – совокупность непустых компактных выпуклых множеств из  $R^2$ ,  $x = (x_1, x_2)$ ,  $\xi_0 = (a_0, \theta_0)$ . Дифференциальное включение (4) взаимно аппроксимирует систему (3) по медленным переменным [2] (на асимптотически большом промежутке времени), если  $\forall \epsilon > 0 \exists m_0 > 0 \forall m \in (0, m_0]$  и произволь-

ного решения  $z(t, m)$ ,  $\gamma(t)$  задачи (3) найдётся решение  $x(mt)$  задачи (4) такое, что  $\|z(t, m) - x(mt)\| < \epsilon \quad \forall t \in [0, 1/m]$ , (5) и, наоборот, для любого решения  $x(mt)$  задачи (4) существует решение  $z(t, m)$ ,  $\gamma(t)$  задачи (3), для которого имеет место оценка (5).

Для построения правой части аппроксимирующей задачи (4) применяем технику опорных функций [2, 3].

Потребуется порождающая система, которая получается из (3), если принять  $m = 0$ , а в качестве начальных условий в момент времени  $t = 0$  рассматривать произвольные значения  $\tilde{z}_0 = (x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in R$ ,  $x_2 \in R$  и  $\tilde{y}_0 \in R$ :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0, & z(0) &= \tilde{z}_0, \\ \dot{g} &\in [w_1, w_2], & g(0) &= \tilde{y}_0. \end{aligned}$$

Отсюда  $a(t) = x_1$ ,  $q(t) = x_2$ .

Опорная функция множества  $F_0(x_1, x_2)$  в направлении вектора  $h = (h_1, h_2)$  сводится к вычислению предела максимального среднего вида  $c(F_0(x_1, x_2), h) =$

$$= \limsup_{\Delta \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta} \int_0^\Delta c(F(\tilde{a}_0, \tilde{q}_0, g(t), t), h) dt,$$

где точная верхняя грань вычисляется по всем решениям типа Каратеодори задачи

$$\dot{g} \in [w_1, w_2], \quad g(0) = \tilde{y}_0.$$

Опорную функцию множества  $F = (F_1, F_2)$ , в рассматриваемом случае сводящегося к точке, на решениях порождающей системы представим в виде

$$\begin{aligned} c(F((x_1, x_2, g(t), t), h) &= \sup_{f \in F} \langle f, h \rangle = \\ &= F_1 h_1 + F_2 h_2 = -\frac{A}{w} \cos g(t) (h_1 \sin(wt + \tilde{q}_0) + \\ &+ \frac{h_2}{\tilde{a}_0} \cos(wt + \tilde{q}_0)). \end{aligned}$$

Тогда опорная функция к множеству  $F_0(x_1, x_2)$  определяется соотношением

$$c(F_0(\tilde{a}_0, \tilde{q}_0), h) =$$

$$= B \limsup_{\Delta \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta} \int_0^\Delta f(t, g(t), \tilde{a}_0, \tilde{q}_0, h) dt, \quad (6)$$

где  $f(t, g(t), \tilde{a}_0, \tilde{q}_0, h) = -\sin(wt + j_0) \cos g$ ,  $\dot{g} \in [w_1, w_2]$ ,  $g(0) = \tilde{y}_0$ ,

$$B = \frac{A}{w} \sqrt{h_1^2 + h_2^2 / \tilde{a}_0^2}, \quad j_0 = \tilde{q}_0 + \arctan \frac{h_2}{\tilde{a}_0 h_1}.$$

Отметим, что поскольку функция  $f$  непрерывная, а компакт  $\{1\} \times [w_1, w_2] \subset R^2$  является невырожденным (не содержится в подпространстве размерности единица), то предел максимального среднего (6) существует и не зависит от начальных условий, более того существует и оптимальное решение задачи (6) [4]. Обозначим значение предела (6) через  $M$ . Положим  $x_1 = \tilde{a}_0$ ,  $x_2 = \tilde{q}_0$ . Тогда выражение для опорной функции к  $F_0(x_1, x_2)$  примет вид

$$c(F_0(x_1, x_2), h) = \frac{AM}{w} \sqrt{h_1^2 + h_2^2 / x_1^2}.$$

Известно, что такую же опорную функцию имеет эллипс [3]:

$$\begin{aligned} F &= \{(x_1, x_2) : (x_1/a)^2 + (x_2/b)^2 \leq 1\}, \\ c(F, h) &= \sqrt{(ah_1)^2 + (bh_2)^2}. \end{aligned}$$

Получаем, что множество скоростей изменения медленных переменных  $F_0(x_1, x_2)$  есть эллипс:

$$F_0(\xi) = \left\{ (\xi_1, \xi_2) : \frac{\xi_1^2}{(AM/\omega)^2} + \frac{\xi_2^2}{(AM/\omega \xi_1)^2} \leq 1 \right\}.$$

Таким образом, правая часть в усреднённом дифференциальном включении (4) определена.

Покажем, что для задачи (4)  $x_1(t) \leq mAMt/w + a_0$  на  $0 \leq t \leq 1/m$ .

В силу того, что скорость изменения  $x_1(t)$  не превосходит правой полуоси эллипса  $\dot{x}_1 \leq mAM/w$ , то наибольшее  $x_1(t)$  найдём, выбрав следующий селектор из эллипса  $F_0(x_1, x_2)$ :

$$\begin{cases} x_1 = mAM/w, & x_1(0) = a_0, \\ x_2 = 0, & x_2(0) = q_0. \end{cases}$$



Следовательно,  $x_1(t) = mMt/w + a_0$ ,  $q = q_0$ . Получаем, что на промежутке  $t \in [0, 1/m]$   $x_1(t) \leq mMt/w + a_0$ .

Так как дифференциальное включение (4) взаимно аппроксимирует систему (3) по медленным переменным, то есть  $\forall \epsilon > 0 \quad \exists m_0 > 0 \quad \forall m \in (0, m_0]$   $|a(t, m) - x_1(m)| < \epsilon$ ,  $|q(t, m) - x_2(m)| < \epsilon$   $\forall t \in [0, 1/m]$ , тогда для задачи (1) имеем  $\max_t |x(t)| = \max_t |a(t)| \leq \mu MAt/\omega + a_0 + \epsilon$ . (7)

Для сравнения приведём выражение для амплитуды в случае резонансного воздействия внешней силы на колебательную систему, в частности, если в задаче (1)  $H(t, x, g) = 0$  и  $g = w$ , то  $|x(t)| \leq m(1/2)At/w + \hat{a}_0$ . (8)

В формуле (7) присутствует значение предела максимального среднего  $M$  функции  $f$ . Для вычисления  $M$  примем  $\omega = 1$ . В силу независимости значения предела  $M$  от начальных условий функция имеет вид:

$f(t, \gamma(t)) = -\sin t \cos \gamma(t)$  и является  $2p$ -периодической по переменным  $t, g$ . Оценим предел, используя метод, предложенный в [5]. Для этого введём максимальное среднее на  $[0, 2\pi]$ :

$$M^{2p} = B \sup_{y_0 \in [0, 2p)} \sup_g \frac{1}{2p} \int_0^{2p} -\sin t \cos g(t) dt, (9)$$

$g \in [w_1, w_2]$ ,  $g(0) = \tilde{y}_0$ . Тогда справедлива оценка предела  $M$ :

$$M^{2p} - k \leq M \leq M^{2p},$$

где  $k = 2C/(w_2 - w_1)$ ,  $w_2 - w_1 > 1$ ,  $C = \max_{t, g} |f(t, g)|$ . Для рассматриваемой функции  $C \leq 1$ , следовательно,  $k = 2/(w_2 - w_1)$ .

Для приближённого вычисления максимального среднего (9) разработан численный метод, основанный на принципе максимума Понтрягина для задачи со свободным концом [6]. Согласно этому принципу, оптимальным решением задачи (9) является решение следующей краевой задачи на отрезке  $[0, 2p]$ :

$$\dot{p} = -\frac{\partial}{\partial \gamma} f(t, \gamma), \quad p(2\pi) = 0,$$

$$p \in G_0(p), \quad \gamma(0) = y_0,$$

$$G_0(p) = \{u \in [\omega_1, \omega_2] : \max_{v \in [\omega_1, \omega_2]} \langle p, v \rangle = \langle p, u \rangle\}.$$

Решения этой краевой задачи содержатся в совокупности решений задачи Коши на отрезке  $[0, 2\pi]$ :

$$\dot{p} = -\frac{\partial}{\partial \gamma} f(t, \gamma), \quad p(2\pi) = 0, (10)$$

$$p \in G_0(p), \quad \gamma(2\pi) = y_{2\pi}.$$

Для определения оптимального управления в (9) численно решается задача (10), которая имеет вид:

$$\dot{p} = -\sin t \cos g(t), \quad p(2p) = 0,$$

$$g(t) = \begin{cases} w_1, & \text{если } p(t) < 0, \\ w_2, & \text{если } p(t) \geq 0, \end{cases} \quad g(2p) = y_{2p},$$

$y_{2p}$  выбирается из отрезка  $[0, 2p]$  в силу  $2p$ -периодичности функции  $f(t, g(t))$ . Заметим, что равенство  $p(t) = 0$  в данной задаче реализуется на множестве меры нуль (по Лебегу) из отрезка  $[0, 2p]$ . Предложенный метод реализован программно в среде Delphi. Некоторые результаты вычислений представлены в табл. 1 ( $\tilde{M}^{2p}$  – значение максимального среднего  $M^{2p}$ , вычисленное программно).

Таблица 1. Результаты вычислений

$\omega_1$	$w_2$	$k$	$\tilde{M}^{2p}$	$\tilde{M}^{2p} - k$
0.25	8	0.25807	0.56333	0.30526
	128	0.01566	0.52941	0.51375
0.5	8	0.26667	0.55146	0.28479
	128	0.01569	0.52497	0.50928
0.75	8	0.27586	0.47526	0.19940
	128	0.01572	0.47215	0.45643

Примечание: Результаты приведены без учёта резонансных случаев для задачи (1), содержащихся в отрезке  $[\omega_1, \omega_2]$ .

Отметим, что при  $[w_1, w_2] = [0.25, 128]$  величина  $M$  из правой части (7), как видно из табл. 1, оценивается снизу числом 0.51375, что превосходит коэффициент  $1/2$ , который присутствует в выражении для главного резонанса (8).

### Библиографический список

1. Боголюбов, Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. - М.: Наука, 1974. - 504 с.
2. Филатов, О. П. Усреднение дифференциальных включений и пределы максимальных средних [Текст] / О. П. Филатов. - Самара: Изд-во «Универс групп», 2009. - 176 с.
3. Благодатских, В. И. Введение в оптимальное управление [Текст] / В. И.

Благодатских. - М.: Высшая школа, 2001. - 239 с.

4. Филатов, О. П. Вычисление пределов максимальных средних для периодических функций [Текст] / О. П. Филатов // Вестн. СамГУ. - Самара, 2011. - № 2. - С. 75-79.

5. Лепилов, А. Н. Вычисление пределов максимальных средних в периодическом случае [Текст] / А. Н. Лепилов // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения – 2011: материалы научной конференции. – Спб.: ООО «ПаркКом», 2011 – С. 85-88.

6. Алексеев, В. М. Оптимальное управление [Текст] / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 408 с.

## CALCULATING MAXIMUM AMPLITUDE IN AN OSCILLATORY SYSTEM WITH MANY-VALUED PERTURBATION

©2012 A. N. Lepilov

Space Rocket Center «TsSKB-Progress», Samara

The paper deals with the task of determining maximum amplitude of harmonic oscillations with a small external many-valued perturbation. An averaged differential inclusion is constructed in order to solve it using the method of support functions. It mutually approximates the initial system on slow variables over the time interval  $[0, 1/m]$ , where  $m$  is perturbation. The problem of calculating the maximum average for the periodic function arises which is solved by an approximate method.

*Oscillatory system, maximum average limit, differential inclusion.*

### Информация об авторе

**Лепилов Александр Николаевич**, начальник группы, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: математические модели, теория управления, дифференциальные включения.

**Lepilov Aleksandr N.**, Head of Unit, Space Rocket Center «TsSKB-Progress». Area of research: mathematical models, control theory, differential inclusion.

УДК 656.7  
ББК 65.40

## КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ ЗВЕНЬЕВ АВИАТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ В РАМКАХ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ МАКРОЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2012 А. А. Пахомов

Иркутский государственный технический университет  
(национальный исследовательский университет)

Авиатранспортная отрасль рассмотрена на макрологистическом уровне, представлена классификация характерных для отрасли потоков. В качестве звеньев макрологистической системы рассмотрены крупные авиапредприятия и предложена классификация моделей их развития в зависимости от целей, задач, функциональных особенностей и процесса формирования.

*Макрологистическая система, авиатранспортная отрасль, модель.*

Авиатранспортная отрасль, рассматриваемая на уровне региона, является сложной макрологистической системой, состоящей из большого количества элементов – звеньев, и характеризуется:

- сложностью и многопрофильностью сервисных потоков, генерирующихся, преобразующихся и поглощающихся звеньями логистической системы;
- сложностью логистических операций и функций, которые выполняют звенья логистической системы, а также, взаимосвязей между ними;
- специфичностью функционирования региональных звеньев логистической системы и потоковых процессов в них;
- наличием множества факторов внешней среды, оказывающих воздействие на деятельность звеньев логистической системы.

Между звеньями, составляющими авиатранспортную отрасль, формируются определённые функциональные связи и отношения. В качестве звена авиатранспортной отрасли можно определить некоторый экономически и функционально обособленный объект, рассматриваемый в рамках процесса формирования и развития макрологистической системы, выполняющий

определённый набор функций для достижения индивидуальной цели. При этом звенья оперируют несколькими типами характерных потоков:

а) внутрирегиональные пассажирские и грузовые потоки. Они формируются внутри региона в так называемых звеньях генерирующего типа, в качестве которых выступают мелкие аэропорты региона. Указанные потоки могут концентрироваться и обрабатываться в звене логистической системы преобразующего типа – крупном аэропорте региона - с последующим перераспределением по внутрирегиональным направлениям, которые, в свою очередь, являются звеньями, поглощающими потоки. Таким образом, региональные аэропорты могут выступать в качестве генерирующих и поглощающих звеньев макрологистической системы;

б) внешние потоки, напротив, формируются вне региона, при этом региональные аэропорты опять же выступают в качестве генерирующих и поглощающих звеньев;

в) экспортные потоки, которые генерирует регион и направляет по федеральным и международным авиалиниям;

б) транзитные и трансферные пассажирские и грузовые потоки, которые формируются вне региона и покидают его, проходя через некоторые звенья логистической системы, которые обрабатывают и преобразуют данные потоки. Трансферные потоки, по своей структуре не отличающиеся от транзитных, но процесс их обработки и преобразования более сложен. При этом перераспределение (т.е. изменение направления) потоков не является обязательным.

Указанные основные типы потоков могут комбинироваться в различных сочетаниях в зависимости от модели развития звена макрологистической системы. Авиатранспортная отрасль на уровне региона представлена следующими звеньями, обладающими наибольшей функциональной значимостью:

- аэропортовыми предприятиями, осуществляющими обслуживание рейсов, а также оказывающими услуги по аэропортовому обслуживанию пассажиров;

- авиакомпаниями - перевозчиками, непосредственно выполняющими процесс перевозки пассажиров и грузов;

- терминально-логистическими комплексами, оказывающими складские, экспедиторские, транспортные услуги, а также выполняющие таможенное оформление грузов;

- топливозаправочными предприятиями и операторами наземно-технического обслуживания (включая линейно-техническое обслуживание воздушных судов), обособленными и выделенными из состава аэропорта.

При всём многообразии звеньев логистических систем можно выделить три их основных типа: генерирующие, преобразующие и поглощающие сервисные, материальные и сопутствующие им информационные и финансовые потоки [1]. В рамках данной классификации рассмотрим звенья

макрологистической системы авиатранспортной отрасли:

- 1) генерирующие звенья. Аэропортовые предприятия и перевозчики генерируют сервисные потоки, т.е. потоки услуг, а также информационные и финансовые;

- 2) преобразующие звенья. Авиапредприятия, преследуя цель получения прибыли, преобразуют материальные, финансовые и информационные потоки в сервисные. Кроме того, аэропорты обрабатывают и перераспределяют пассажиро- и грузопотоки, что также является преобразованием;

- 3) поглощающие звенья. Как было отмечено выше, аэропорты являются генерирующими звеньями, поскольку создают сервисные потоки для потребления авиакомпаниями, пассажирами и другими клиентами, но при этом они также относятся к звеньям поглощающего типа, поскольку поглощают сервисные потоки, генерируемые авиакомпаниями.

Особенностями реально функционирующих звеньев, составляющих отрасль авиаперевозок регионального уровня, являются:

- различные цели функционирования, перспективы и возможности развития;

- различная форма собственности и организационно-правовая форма;

- человеческий фактор в структуре звеньев авиатранспорта, предопределяющий значимость субъективных факторов;

- вероятностный характер некоторых внутренних процессов, затрудняющий формирование логистического управления звеньями;

- сложность взаимосвязей между звеньями логистической системы;

- сложность определения качественных критериев функционирования звеньев логистической системы.

Необходимо отметить, что большинство звеньев авиатранспортной отрасли являются самостоятельно

хозяйствующими субъектами рынка со своими организационно-функциональными структурами и локальными критериями оптимизации функционирования, которые в общем случае могут не совпадать с глобальной целью.

Рассматриваемая макро-логистическая система оперирует двумя характерными потоками – пассажирскими (человеческими) и грузовыми (материальными). Исходя из этого, основными звеньями указанной системы являются авиапредприятия. Под авиапредприятием понимается предприятие гражданской авиации, основной функцией которого является непосредственно обслуживание пассажирских и грузовых потоков. Анализ современного состояния отрасли авиаперевозок в России и за рубежом позволяет предложить следующую классификацию моделей крупных авиапредприятий, функционирующих в рамках региона:

- 1) авиатранспортный комплекс;
- 2) хаб региональный;
- 3) хаб международный;
- 4) транзитный авиакомплекс.

Ярким примером авиатранспортного комплекса является Московский авиаузел, основу которого составляют несколько крупных аэропортов и базовых авиакомпаний, конкурирующих между собой. На отечественном рынке представлена также модель регионального хаба в Новосибирской и Свердловской областях. Речь идёт о крупных аэропортах «Толмачево» и «Кольцово» в сочетании с базовыми авиакомпаниями «Сибирь» (S7-Airlines) и «Уральские Авиалинии» (Ural Airlines). Обычно при использовании модели регионального хаба аэропорты региона не ведут жёсткой конкурентной борьбы между собой, а, напротив, обеспечивают потоками аэропорт-хаб для концентрации, обработки и перераспределения указанных потоков по направлениям внутри страны и частично по международным направлениям. Ввиду отставания в развитии авиатранспорта от

ряда европейских и азиатских стран в России на сегодняшний день нет предприятий, которые можно было бы классифицировать как международные хабы. Основной отличительной функциональной особенностью международного хаба от регионального является обеспечение обработки и перераспределения потоков не только внутри страны, но и между государствами. По этому принципу работают лондонский «Хитроу» (London Heathrow Airport), парижский аэропорт им. Шарля де Голля (Paris-Charles de Gaulle Airport), пекинский «Столичный международный аэропорт» (Beijing Capital International Airport), гонконгский «Международный аэропорт» (Hong Kong International Airport), аэропорты Франкфурта-на-Майне, Атланты, Чикаго и др. Основная задача транзитного авиакомплекса заключается непосредственно в техническом обслуживании транзитных потоков воздушных судов. Фактически транзитный авиакомплекс не является аэропортом и фиксирует свою работу в рамках обеспечения операций взлёта, посадки, дозаправки топливом воздушных судов, их аэронавигационного обслуживания. При этом может обеспечиваться минимум терминального обслуживания пассажирских и грузовых потоков. Например, во время технического обслуживания самолёта или замены воздушного судна пассажиры могут быть размещены в специальном трансферном терминале.

Данный тип авиапредприятия является новым для отрасли, но имеет серьёзные предпосылки развития в некоторых государствах. Можно выделить два основополагающих условия развития данной модели:

- относительно низкая стоимость авиационного керосина в регионе;
- выгодное в части построения маршрутов географическое расположение.

Очевидно, что указанные условия определяют экономику транзитных авиалиний. В современных условиях

рынка авиаперевозок некоторые предприятия отрасли активно используют принципы работы транзитного авиакомплекса, например аэропорт Дубаи. В этом случае соблюдается первое условие – низкая стоимость топлива. Но если говорить о выгодном географическом положении, то города России, расположенные между Европой и динамично развивающейся Азией, уже давно рассматриваются экспертами и инвесторами для реализации на их территории модели транзитного авиакомплекса. При этом потенциальный объем годовой выручки от предоставления услуг по международному воздушному транзиту через территорию России оценивается в 10 млрд долл [2].

Охарактеризуем более подробно процесс формирования каждой из представленных моделей звеньев отрасли воздушных перевозок. Модель авиатранспортного комплекса характерна для столиц с большим населением. В Москве формирование авиатранспортного комплекса носит стохастический характер, он развивается хаотично и представлен тремя крупными аэропортами – «Домодедово», «Шереметьево» и «Внуково», а также, крупнейшими отечественными авиакомпаниями, формирующими основу маршрутной сети указанных аэропортов. Первоначальной задачей трёх аэропортов было непосредственное обслуживание пассажиропотока столицы и Подмосковья. Поэтому в ближайшее время появления такого комплекса не ожидается на территории других регионов страны, с учётом темпов их развития, низкой численности и плотности населения, недостаточного уровня доходов, а значит и низкого коэффициента авиационной подвижности граждан. На сегодняшний день каждый из основных участников рынка авиаперевозок Москвы имеет индивидуальную программу развития, собственных инвесторов и топ-менеджмент, поэтому данный авиатранспортный комплекс представляет собой конкурентную среду, каждый

элемент которой направлен на достижение собственных целей, игнорируя цели и интересы других элементов. В случае с Москвой конечным результатом конкурентной борьбы может стать возможность обработки всех потоков центра одним из указанных авиাপредприятий (при этом остальные конкуренты будут вынуждены ориентироваться на региональные или международные потоки) или трансформация в хаб международного уровня. Вместе с тем Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года предполагает, что развитие аэродромной сети должно соответствовать возрастающим потребностям населения и российской экономики в воздушных перевозках и авиационных работах, повышению уровня вовлечённости России в мировые рынки товаров и услуг, в том числе рынки авиаперевозок и аэропортового обслуживания [3].

Основной целью регионального хаба является концентрация пассажирских и грузовых потоков, поступающих из населённых пунктов региона, обработка и распределение этих потоков по множеству направлений региональных и федеральных авиалиний и в некоторых случаях международных авиалиний. Эта модель обычно получает развитие в региональных центрах с соответствующей численностью населения. Функционально модель регионального хаба следует рассматривать как комплекс предприятий отрасли, расположенных в регионе. Состоит этот комплекс из основного авиаузла региона (находящегося в большинстве случаев в региональном центре) и мелких аэропортов, расположенных в населённых пунктах региона, которые и обеспечивают основной узел необходимыми потоками. Деятельность регионального хаба направлена не на обострение конкуренции внутри региона, а на улучшение конкурентных преимуществ самого региона и оптимизацию работы всей

авиатранспортной системы государства, построенной на хабовых принципах. При этом система региональных хабов, расположенных в различных регионах страны и взаимодействующих между собой, также может быть рассмотрена в комплексе. Такая система выполняет гораздо более важные функции для отрасли в целом, чем авиатранспортный комплекс.

Следует отметить, что характерной общей особенностью всех предприятий авиатранспортной отрасли, работающих по известному принципу «hub-and-spoke» является наличие базовой авиакомпания (или нескольких авиакомпаний), которая обеспечивает поступление и перераспределение большей части потоков.

Положительный результат организации хаба во многом обусловлен координацией функциональных связей при взаимодействии аэропорта с авиакомпанией как основным партнером, во многом определяющим качественные и экономические показатели совместной деятельности [4].

Хаб международный, в сравнении с региональным, более крупное предприятие, способное обеспечивать обработку и распределение потоков аналогично региональному хабу, но больших объемов. Однако обязательным условием для соответствия предприятия классу международного хаба является обеспечение концентрации, обработки и распределения потоков международных авиалиний по международным направлениям. При этом модель может быть реализована вне зависимости от численности населения региона и от объема территории. Определяющее значение имеет территориальная расположенность хаба и лояльность таможенного режима. Он должен располагаться на пересечении основных международных воздушных трасс, т.е. таким образом, чтобы перераспределение потоков в нём было целесообразно. А также на территории данного предприятия обычно действует

таможенный режим, позволяющий упростить формальности, а в некоторых случаях - особый экономический режим, способствующий развитию бизнеса. В международном хабе работают несколько крупных базовых перевозчиков, которые не только обеспечивают транспортировку международных потоков, но и отчасти формируют наземную инфраструктуру хаба.

В случае с транзитным авиакомплексом наличие базового перевозчика не требуется, важнейшим фактором, определяющим успешное функционирование данной модели, являются высокие объёмные показатели. Задача транзитного авиакомплекса заключается в оперативном обслуживании большого количества воздушных судов. Так, в разрабатываемых сегодня проектах строительства транзитных авиакомплексов существуют технологические решения с несколькими взлётно-посадочными полосами – от четырёх до восьми, что предполагает быстрое, независимое и бесперебойное обеспечение большого объёма самолётовывлетов. В частности, для России этот объём может быть обеспечен рейсами, следующими по коридору «Европа – Азия», а также по кроссполярным маршрутам, проходящим над Северным полюсом и связывающим Азию с Америкой. Поскольку транзитный авиакомплекс фактически не является аэропортом, его формирование и функционирование не имеет серьёзной зависимости от численности населения региона и площади территории. Удобное географическое расположение, высокий уровень транзитного потенциала, низкий уровень цен на авиационное топливо в регионе являются определяющими факторами для успешной работы данной модели авиапредприятия. В отличие от первых трёх случаев транзитный авиакомплекс не имеет базовой авиакомпании, однако оказывает серьёзную конкуренцию предприятиям отрасли (в том числе международным) в части обслуживания транзитных потоков.

Тип макрологистической модели звена авиатранспортной отрасли определяется и может изменяться в зависимости от ряда факторов: вектора социально-экономического развития региона, его возможностей и потенциала, численности населения, степени развития

территорий, транспортной инфраструктуры, а также уровня конкуренции в отрасли.

На основании вышеизложенного рассмотрим классификацию согласно критериям, определяющим процесс формирование авиапредприятий (табл. 1).

Таблица 1. Классификация логистических моделей в рамках процесса формирования авиапредприятий

Критерий классификации	Логистическая модель авиапредприятия			
	авиатранспортный комплекс	хаб региональный	хаб международный	транзитный авиакомплекс
уровень населения в регионе	высокий	средний	средний	не имеет принципиального значения
уровень конкуренции	высокий	средний	высокий	практически отсутствует
географическое положение	вблизи столицы или крупного мегаполиса	умеренное значение	умеренное значение	определяющее значение
таможенный режим	не имеет принципиального значения	не имеет принципиального значения	определяющее значение	умеренное значение

Своеобразные функциональные особенности авиапредприятий позволяют рассматривать классификацию логистических моделей по функциональным признакам звеньев (табл. 2).

Таблица 2. Классификация логистических моделей по функциональным признакам

Критерий классификации	Логистическая модель авиапредприятия			
	авиатранспортный комплекс	хаб региональный	хаб международный	транзитный авиакомплекс
принцип составления расписания	обеспечение обслуживания всех авиакомпаний	реализация принципов «hub-and-spoke»	реализация принципов «hub-and-spoke»	обеспечение наименьшего ожидания между рейсами
принципиальная направленность потоков	различная, входные потоки преимущественно региональные	входные потоки преимущественно региональные, выходные - федеральные и частично международные	входные и выходные потоки международные	не имеет принципиального значения
скорость технологических операций	умеренное значение	умеренное значение	определяющее значение	определяющее значение
развитость вспомогательной инфраструктуры	умеренное значение	умеренное значение	определяющее значение	не имеет принципиального значения

Отметим ряд общих особенностей, характерных для всех рассмотренных моделей звеньев, составляющих авиатранспортную отрасль на региональном уровне:

- способность к типовой трансформации. В зависимости от изменений конъюнктуры рынка функции авиапредприятий могут со временем измениться полностью или частично, что



предопределяет изменение типа модели. Данная особенность может проявиться в результате изменения долгосрочных целей авиапредприятия или как реакция на влияние окружающей среды;

- сочетаемость функциональных свойств различных моделей. Практическая реализация рассмотренных моделей часто предполагает использование на одном предприятии функциональных особенностей нескольких моделей;

- масштабность. Реализация моделей на практике позволяет сделать вывод о том, что все предприятия, использующие эти модели, достаточно крупные и имеют весомое значение в отрасли. По техническому, технологическому, инфраструктурному развитию, численности персонала они превосходят многие авиапредприятия традиционного формата;

- частная принадлежность капитала, разделение бизнеса и управления. Для большинства авиапредприятий характерна частная собственность. При этом собственники топливозаправочных, граундхендлинговых, кейтеринговых компаний, а также, пассажирских и грузовых терминалов могут быть различными, но управленческие функции выполняет единый административный центр.

Для успешной реализации намеченных планов по развитию отрасли гражданских перевозок, в том числе формированию национальной опорной сети аэропортов, классификация логистических моделей звеньев авиатранспортной отрасли актуальна. При переходе к интенсивному, инновационному, социально ориентированному типу развития Российская Федерация стремится стать одним из лидеров глобальной экономики, что требует принятия адекватных стратегических решений по развитию транспортного комплекса на долгосрочную

перспективу [5]. Решение указанных задач обеспечивается в ходе инновационного развития авиатранспортной системы, одним из основных приоритетов такого развития должна быть научно обоснованная организация соответствующих процессов в отрасли.

### Библиографический список

1. Аникин, Б. А. Коммерческая логистика [Текст]: учеб. пособие для вузов / Б. А. Аникин, А. П. Тяпухин. – М.: Проспект, 2009. - С.32-35.

2. Доклад о результатах и основных направлениях деятельности Министерства транспорта Российской Федерации на 2009–2011 годы [Электронный ресурс]: официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации. - Режим доступа: [http://www.mintrans.ru:8080/Pressa/Deyatelnost/Deyat\\_2009\\_2011.pdf/](http://www.mintrans.ru:8080/Pressa/Deyatelnost/Deyat_2009_2011.pdf/).

3. Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года [Электронный ресурс]: официальный сайт ассоциации гражданской авиации «Аэропорт». - Режим доступа: <http://www.airport.org.ru/kr.doc/>.

4. Андреев, А. В. Организация «хабов» как инструмент достижения синергетического эффекта во взаимодействии авиакомпаний и аэропорта [Текст] // А. В. Андреев, А. И. Козлов – Научный вестник МГТУ ГА. - № 118. - 2007. - С. 75.

5. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]: официальный сайт Федерального дорожного агентства Министерства трансп. Российской Федерации. - Режим доступа: [http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye\\_dokumenty/transportnaya\\_strategiya\\_rf\\_na\\_period\\_do\\_2030\\_goda.html/](http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/transportnaya_strategiya_rf_na_period_do_2030_goda.html/).

## **CLASSIFICATION OF MODELS OF BASIC LINKS IN THE AIR TRANSPORT SECTOR IN THE CONTEXT OF THE PROCESS OF MACROLOGISTIC SYSTEM FORMATION AND DEVELOPMENT**

© 2012 A. A. Pakhomov

Irkutsk State Technical University (National research university)

Air transport sector is studied on the macrologistic basis, a classification of lines, typical for this sector, is presented. Large air companies are reviewed as links of a macrologistic system and a classification of models of these air companies is proposed depending on the aims, functional characteristics and the process of formation.

*Macrologistic system, air transport sector, model.*

### **Информация об авторе**

**Пахомов Александр Артурович**, аспирант, Иркутский государственный технический университет. E-mail: [ale-art@mail.ru](mailto:ale-art@mail.ru). Область научных интересов: макрологистика, экономика воздушного транспорта.

**Pakhomov Alexander Arturovich**, postgraduate student of the Irkutsk State Technical University. E-mail: [ale-art@mail.ru](mailto:ale-art@mail.ru). Area of research: macrologistic, economics of air transport.

УДК 681.51:629.78

## ВИЗУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЕРИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2012 А. А. Тюгашев, А. Ю. Богатов, А. В. Шулындин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Описывается подход и поддерживающие его инструментальные программы, позволяющие проводить визуальную верификацию корректности синхронизации процессов, выполнение которых координируется на борту космического аппарата с помощью программ комплексного функционирования, реализующих управляющие алгоритмы реального времени. Разработка дополняет и может использоваться совместно с ранее описанной средой проектирования и разработки управляющих алгоритмов ГРАФКОНТ.

*Управляющий алгоритм реального времени, бортовое программное обеспечение, космический аппарат, верификация, визуализация.*

### Введение

ЭВМ широко применяются как главный компонент автоматизированных систем управления сложными техническими объектами, комплексами, технологическими процессами [5, 7, 8]. Как правило, реализация алгоритмов управления возлагается на специализированное программное обеспечение (ПО), функционирующее в режиме реального времени. Программы такого рода обычно относятся к критическим - ошибка в них может привести к катастрофе, весьма значительным материальным и финансовым потерям, человеческим жертвам. В сетевом графике работ по созданию ракетно-космических комплексов критическим путём иногда является именно разработка системы управления. При этом в разработку бортового ПО вовлечены десятки людей, включая специалистов по бортовым системам, алгоритмистов, программистов и пр. В связи с этим вопросам обеспечения их корректности и надёжности уделяется особое внимание [5, 7]. Для достижения надлежащего уровня качества и надёжности управляющего программного обеспечения оно проходит многоступенчатый процесс тестирования и отладки.

К сожалению, тестирование ПО не может гарантировать отсутствие ошибок, а лишь позволяет обнаружить их наличие, причём не всегда. Всё это делает актуальным разработку и применение иных методов верификации и валидации, к которым можно отнести: инспекции текстов программ; символьное (символическое) выполнение; различные методы формальной верификации, использующие логический вывод [5]; проверку моделей (model checking) [6]. Весьма перспективными представляются подходы с автоматической генерацией заведомо правильной программы по некоторой высокоуровневой спецификации [8, 9, 11].

Одним из перспективных направлений здесь является применение различных визуальных средств. Среди наиболее естественных форм представления (восприятия) информации для человека можно выделить графический образ – рисунок, чертёж, схема и т.д. [1, 8, 12]. К этой форме человек прибегает всякий раз (возможно неявно для себя), когда необходимо решать (описывать, формулировать) действительно сложные задачи. В качестве типичных эпитетов для графического представления используются "дружест-

венный", "интуитивный", "простой", "привычный" и др. Человек способен за доли секунды воспринимать визуальную сцену целиком (симультанное восприятие), с моментальной качественной оценкой ряда важных свойств изображения.

Для использования на различных стадиях проектирования и разработки ПО для космических аппаратов графических средств имеется ряд весомых предпосылок [5, 9, 12]. Среди них можно выделить:

• сложность строгой и непротиворечивой спецификации требований к управляющим алгоритмам и достижения взаимопонимания между проектировщиками бортовых систем, алгоритмистами и программистами;

• необходимость тщательного документирования ПО, незамедлительного и точного отражения в документации всех изменений, вносимых в программы (поддержание актуальности документации);

• вероятность использования различных бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) и программных платформ.

Заметим, что системы реального времени можно разделить на два больших класса: системы, управляемые событиями, и системы, управляемые временем. Для управляемых событиями систем не имеет первостепенного значения момент события, важно лишь время, затрачиваемое на реакцию на него (таким образом, они «асинхронны» в некотором смысле), в то время как в управляемых временем системах именно наступление заданного момента времени является «спусковым механизмом» выполнения действий. Главным при этом является реализация некоторого плана управления (расписания) с привязкой протекающих процессов ко времени и корректным их согласованием (синхронизацией) друг с другом. С подобной ситуацией сталкиваются, когда необходимо обеспечить реализацию управления сложным техническим комплексом, содержащим большое число агрегатов,

приборов и систем, которые должны работать совместно при решении сложных задач, например, космическим аппаратом (КА) [5, 7]. Среди важнейших требований, которым должно удовлетворять управляющее ПО, можно выделить класс требований к правильной синхронизации параллельно протекающих процессов. Примерами могут служить: «Процессы П1 и П11 должны стартовать одновременно», «Процесс П12 начинается по окончании процесса П11», «Процессы П3, П4 и П5 завершаются до начала исполнения процесса П8».

К сожалению, несмотря на достаточно широкое распространение визуальных методов в современном программировании и Computer Science [1, 2, 3], в известных методологиях визуального моделирования, в частности UML, описание синхронизирующих свойств программ реального времени до недавнего времени не поддерживалось. Лишь начиная с версии UML 2.0 были сделаны некоторые шаги в данном направлении, всё ещё остающиеся недостаточными для практического использования при верификации программ. Анализ имеющихся отечественных и зарубежных источников [1, 2, 3, 4, 5] не позволяет говорить о применении метода визуальной верификации (контроля человеком, не говоря о системах визуальной отладки алгоритмов) для проверки управляющих программ реального времени, используемых в промышленности.

Настоящая статья посвящена описанию подхода к проверке (верификации) управляющих алгоритмов и программ для КА путём оценки (визуального контроля) человеком важнейших синхронизирующих свойств критических секций алгоритма (с последующим уточнением и детализацией) и поддерживающих данный подход инструментальных программных средств.

## Визуальная верификация управляющих алгоритмов реального времени (УА РВ)

Как отмечено выше, при описании систем реального времени весьма важной становится корректность синхронизации параллельно протекающих процессов. Ключевыми связками здесь являются: совпадение по началу, следование, совпадение по концу. Для этих связей наиболее естественным является наглядное представление в виде циклограммы (диаграммы Ганта) (рис. 1).

А. А. Тюгашевым и А. А. Калентьевым была предложена соответствующая графическому представлению в виде циклограммы математическая модель семантики УА РВ на основе набора кортежей, описывающих выполнение управляющим алгоритмом различных функциональных задач в требуемые моменты времени в зависимости от истинности тех или иных логических условий [9, 10]. В этой модели семантика УА РВ может быть определена как набор кортежей (четвёрок):

$$UA\ PB = \{ \langle f_i, t_i, t_i, \bar{l}_i \rangle \}, i=1, \bar{N} ,$$

где  $f_i$  – функциональная задача (действие);  $t_i$  – момент начала выполнения действия (целое число);  $t_i$  – длительность действия (целое неотрицательное число);  $\bar{l}_i$  – логический вектор, включающий набор значений условий в трёхзначной логике, определяющий исполнение действия. При определении семантики УА РВ происходит привязка выполнения функциональных задач к требуемым моментам времени и обусловливание их выполнения.

*Пример.* Фрагмент семантики УА РВ может выглядеть как :  $\langle \{f_1, 0, 100, (\alpha_1=Л, \alpha_2=Л)\}, \{f_2, 450, 20, (\alpha_1=И, \alpha_2=Л)\}, \{f_3, 210, 310, (\alpha_1=Л, \alpha_2=Л)\}, \{f_4, 0, 210, (\alpha_1=И, \alpha_2=И)\} \rangle$ .

В данной модели не задаётся явным образом передача управления от одной функциональной задачи к другой, что позволяет реализовывать одну и ту же семантику программами с различными управляющими графами (говоря более точно, логико-временными схемами – аналогами управляющих графов для программ реального времени [9, 11]).

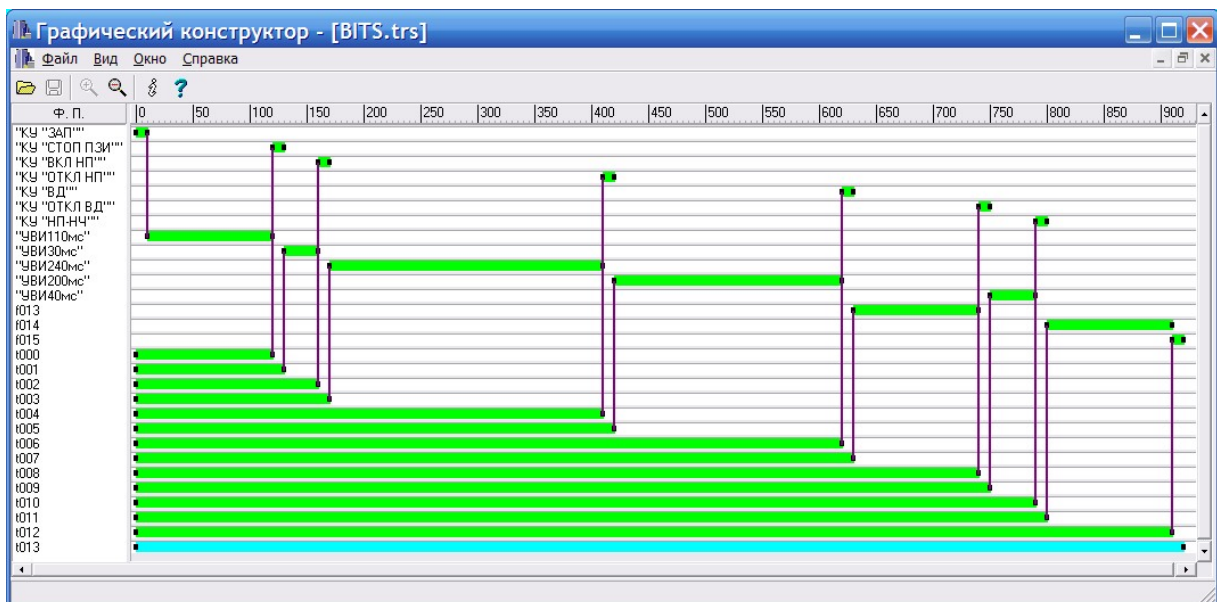


Рис. 1. Визуальная верификация циклограммы управляющего алгоритма

Заметим, что это открывает возможность проведения оптимизирующих преобразований управляющих программ. Ситуация здесь аналогична той, которая возникает в случае вычислительных алгоритмов, когда могут быть написаны несколько вариантов программы, осуществляющей одно и то же функциональное преобразование входных данных в выходные.

При анализе циклограммы управляющего алгоритма программиста могут интересовать ответы на вопросы вида: «Завершается ли выполнение функциональной задачи  $f_1$  до начала выполнения функциональной задачи  $f_2$ ?», «Одновременно ли начинается выполнение функциональных задач  $f_1$  и  $f_5$ ?», «Возможно ли при какой-то комбинации логических условий наложение выполнения функциональных задач  $f_5$  и  $f_3$  во времени?», «Заканчивается ли выполнение функциональной задачи  $f_3$  к моменту времени  $t=500$ ?» и т.д. Подобные вопросы возникают при контроле выполнения важнейших свойств управляющих алгоритмов, задаваемых в спецификациях. Визуальное представление позволяет разработчику быстро оценить выполнение необходимых свойств и затем, при необходимости, использовать для уточнения специальный инструментарий.

В разработанной авторами ранее системе информационной поддержки жизненного цикла ПО КА - ГРАФКОНТ [9, 11] используются связки проблемно-ориентированного языка описания управляющих алгоритмов реального времени [9, 10], отражающие согласование выполнения отдельных функциональных задач во времени и в логическом пространстве. Например, запись  $f_1 \rightarrow f_2$  означает, что выполнение функциональных задач  $f_1$  и  $f_2$  связано непосредственным следованием

во времени,  $f_1 \text{ СН } f_2$  – что они должны начинаться одновременно,  $(\sim\alpha_3) \Rightarrow f_7$  - что выполнение ФЗ  $f_7$  обуславливается ложностью условия  $\alpha_3$ . Каким образом можно проконтролировать выполнение управляющей программой на практике спецификаций, построенных подобным образом? В системе ГРАФКОНТ для обратного инжиниринга (*reverse engineering*) бортовых программ управления используется простой алгоритм, позволяющий по имеющейся программе построить на первом шаге ее логико-временную схему, а затем - семантику в приведённом выше смысле (реализуемое расписание).

В соответствии с этим внутренние структуры данных системы ГРАФКОНТ пригодны для формирования визуальных представлений семантики (циклограммы) алгоритма, на основе чего становится возможным проводить их визуальную верификацию. Однако в описанной в [9-11] системе ГРАФКОНТ, несмотря на достаточно богатое использование визуальных средств, данная возможность не была в полной мере реализована. В результате проведённых авторами работ в дополнение системы ГРАФКОНТ были созданы и испытаны специальные инструменты визуализации. Данные инструменты позволяют проводить автоматизированную верификацию выполнения временных ограничений и требований необходимой синхронизации процессов. При этом с помощью дополнительной несложной алгоритмической обработки помимо наглядного изображения, используемого для визуального контроля выполнения целевых свойств человеком (рис. 2), может быть автоматически построен набор формул исчисления УА РВ, истинных на данной семантической модели (рис. 3).

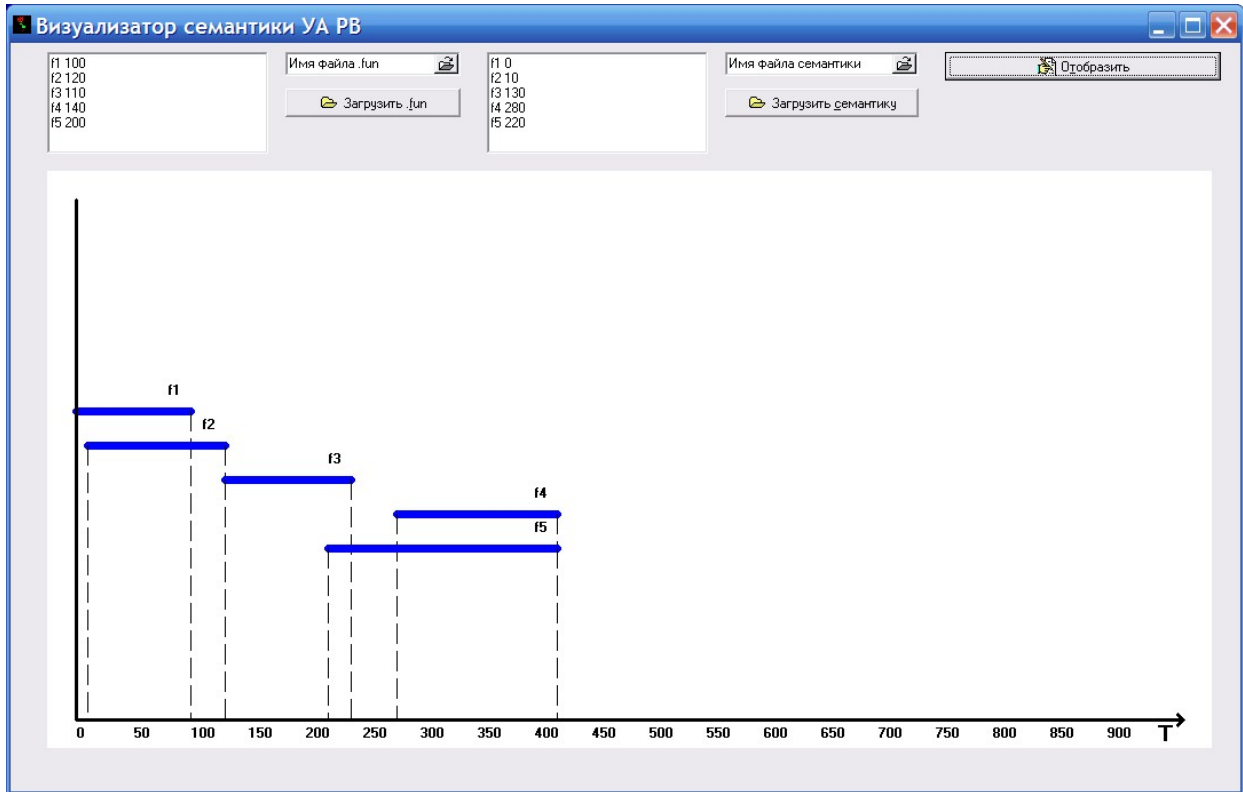


Рис. 2. Визуальный контроль семантики по системной таблице

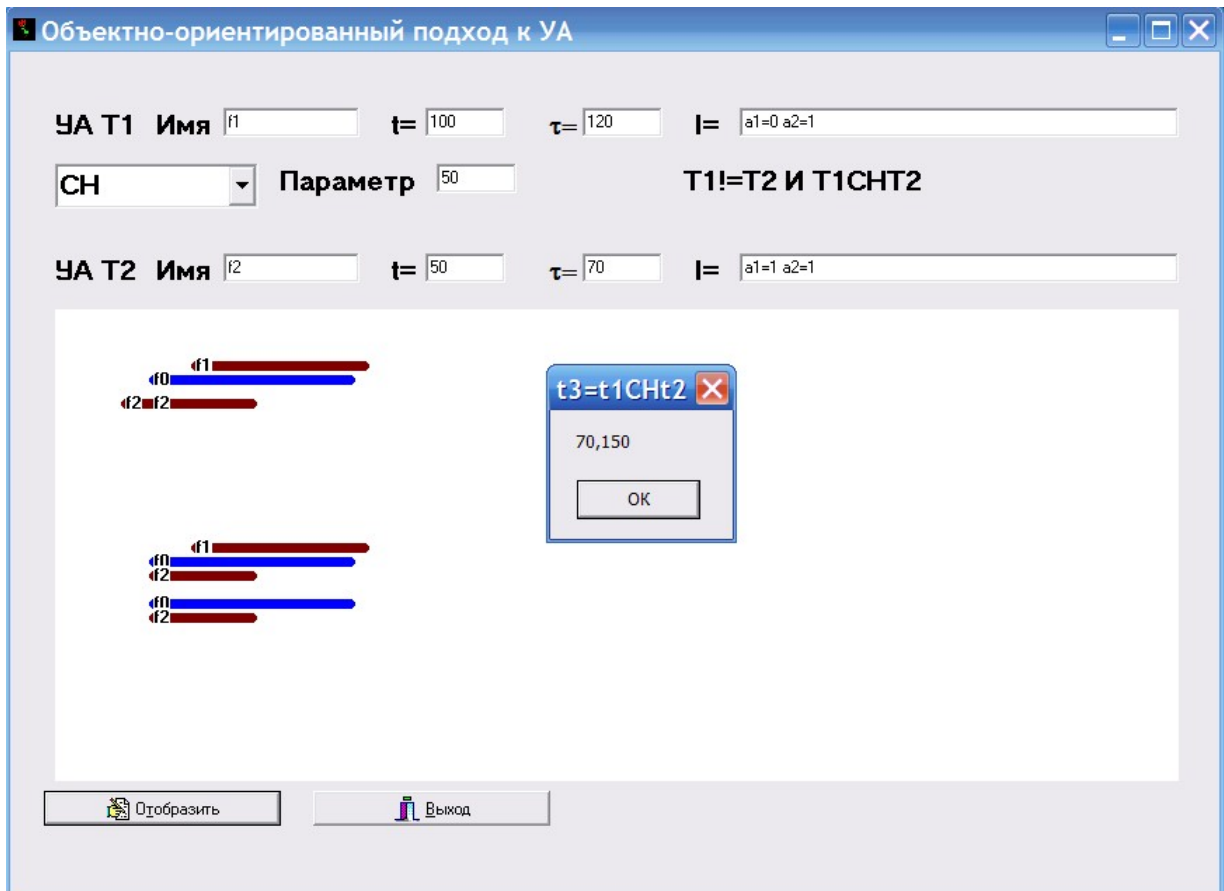


Рис. 3. Автоматическое выявление стандартных временных связей

Таким образом, используемая модель семантики позволяет производить проверку (верификацию) необходимых свойств на семантической модели, т.е. использовать некий аналог метода model checking.

Заметим, что исчисление УА РВ [10, 11] за счёт наличия в нём набора правил вывода даёт возможность проводить и формальную дедуктивную верификацию выполнения временных спецификаций.

### Заключение

С использованием инструментальных программных средств визуализации семантики управляющих алгоритмов реального времени возможна визуальная проверка свойств УА РВ, связанных с синхронизацией выполняемых функциональных задач. Данные средства являются дополнением и дальнейшим развитием инструментального программного комплекса ГРАФКОНТ/ГЕОЗ, разработанного по заказу ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» в СГАУ с целью сокращения затрат времени и труда при разработке управляющих бортовых программ, повысить надёжность и качество бортового ПО, снизить зависимость от опыта и искусства отдельно взятого проектанта или программиста.

### Библиографический список

1. Parker, D. A. Survey of Visual Programming Tools / D. Parker - Technical Report, University of Alberta, Canada, 2003.
2. Boshernitsan, M. Visual Programming Languages: A Survey / M. Boshernitsan, M. S. Downes. - Technical Report No. UCB/CSD-04-1368 Computer Science Division, EECS University of California, 2004.
3. Glinert, E. P. Visual Programming Environments: Paradigms and Systems, 1990.
4. Авербух, В. Л. Современные тенденции в разработке средств визуализации программного обеспечения параллельных вычислений [Текст] / В. Л. Авербух, М. О. Бахтерев, П. А. Васёв и др. // Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: тез. докл. – Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2011. С. 18-19.
5. Jia, Xu. On Inspection and Verification of Software with Timing Requirements / Xu Jia // IEEE transactions on software engineering. Vol. 29, No. 8, august 2003.
6. Кларк, Э. Верификация моделей программ: Model checking [Текст] / Э. Кларк. Грумберг, Пелед. - МЦНМО, 2002.
7. Управление космическими аппаратами зондирования Земли [Текст]: Компьютерные технологии / Д. И. Козлов, Г. П. Аншаков, Я. А. Мостовой, и др. – М.: Машиностроение, 1998.
8. Зюбин, В. Е. Графические и текстовые формы спецификации сложных управляющих алгоритмов: непримиримая оппозиция или кооперация? [Текст] / В. Е. Зюбин // сб. тр. VII Международ. конф. по электрон. публикациям "EL-Pub2002" - Новосибирск, 2003.
9. Тюгашев А. А. Интегрированная среда для проектирования управляющих алгоритмов реального времени [Текст] / А. А. Тюгашев // Изв. РАН. Теория и процессы управления. - 2006. - № 2. - С. 128-141.
10. Калентьев, А. А. ИПИ/CALS технологии в жизненном цикле комплексных программ управления [Текст] / А. А. Калентьев, А. А. Тюгашев. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН. - 2006.
11. Тюгашев, А. А. Автоматизация спецификации, верификации и синтеза управляющих программ реального времени с применением логического и алгебраического подходов. [Текст] / А. А. Тюгашев // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2007. - № 7. - С. 46-51.
12. Тюгашев, А. А. Графические языки программирования и их применение в системах управления реального времени [Текст] / А. А. Тюгашев; Рос. акад. наук, Самар. науч. центр. - Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2009.



## VISUAL APPROACH TO VERIFICATION OF REAL-TIME CONTROL SOFTWARE

© 2012 A. A. Tyugashev, A. Yu. Bogatov, A. V. Shulyndin

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper is devoted to the problem of verification of critical real-time control programs, for example, verification of spacecraft onboard software. A special software complex supporting visual verification of correct synchronization between the controlled processes is described in the paper. A semantic model of real-time control algorithm is also provided.

*Real-time control algorithm, onboard software, space vehicle, verification, visualization.*

### Информация об авторах

**Тюгашев Андрей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [tau797@mail.ru](mailto:tau797@mail.ru). Область научных интересов: автоматизация процессов жизненного цикла, методы спецификации, синтеза и верификации управляющего программного обеспечения реального времени.

**Богатов Артем Юрьевич**, аспирант кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [artmbogatov@yandex.ru](mailto:artmbogatov@yandex.ru). Область научных интересов: автоматизация проектирования, оптимизация управляющих программ.

**Шулындин Александр Вадимович**, аспирант кафедры программных систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sasha2410@mail.ru](mailto:sasha2410@mail.ru). Область научных интересов: верификация управляющих программ, верификация спецификаций программ.

**Tyugashev Andrey Alexandrovich**, doctor of sciences, professor of the program systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [tau797@mail.ru](mailto:tau797@mail.ru). Area of research: automation of life-cycle processes, methods of synthesis, specification and verification of real-time control software.

**Bogatov Artyom Yuryevich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [artmbogatov@yandex.ru](mailto:artmbogatov@yandex.ru). Area of research: automation of software design, optimization of control software.

**Shulyndin Alexander Vadimovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sasha2410@mail.ru](mailto:sasha2410@mail.ru). Area of research: specification and verification of real-time control software.

ББК 65.053

## ПОВЫШЕНИЕ РОЛИ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ НА ОБЪЕКТАХ, ПОДКОНТРОЛЬНЫХ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЕ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ

©2012 В. А. Барвинок, Л. А. Наумов, А. В. Долгих

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведён анализ методов оценки соответствия опасных производственных объектов, подконтрольных Ростехнадзору, разработаны мероприятия по повышению качества оценки соответствия, роль которой имеет большое значение в снижении влияния негативных факторов в области промышленной безопасности.

*Аудит, мониторинг, аккредитация, сертификация, аттестация, измерения, контроль, испытания, постоянное улучшение.*

В настоящее время в России функционирует большое число предприятий, эксплуатирующих опасные производственные объекты (ОПО). Существует множество факторов, которые негативно влияют на состояние промышленной безопасности этих предприятий и приводят к серьёзным авариям, человеческим жертвам и загрязнению окружающей среды. К таким факторам относятся: неудовлетворительное состояние оборудования, зданий, сооружений; несовершенство технологий; низкая квалификация персонала;

умышленное отключение защиты; нарушение производственной дисциплины; неэффективность производственного контроля; неправильная организация работ; нарушение технологии и др. [1]. Современное состояние факторов, влияющих на состояние промышленной безопасности по данным, собранным и обобщённым из «Информационного бюллетеня Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору» за 2009-2011 гг., представлено на рис.1.

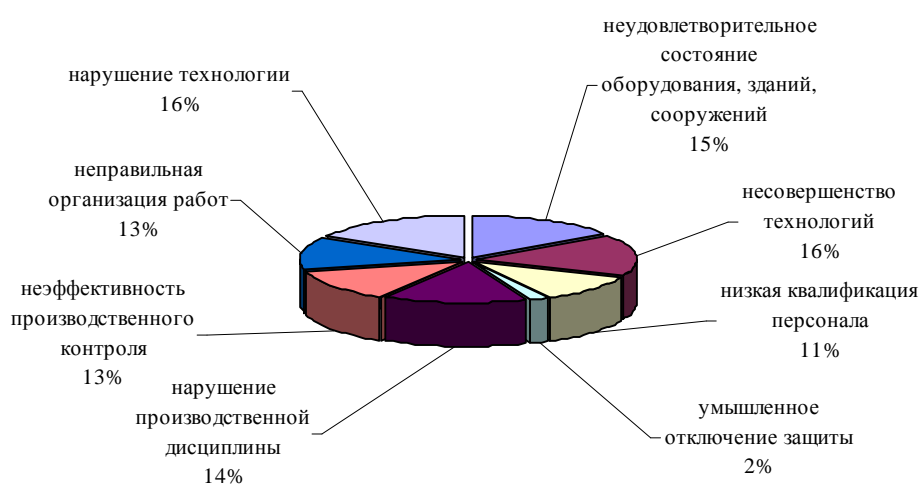


Рис. 1. Современное состояние факторов, влияющих на состояние промышленной безопасности

Важную роль в снижении негативного влияния этих факторов и сокращения их числа играют различные методы оценки соответствия. Например, для снижения негативного влияния неквалифицированного персонала, работающего на ОПО, используется аттестация (сертификация) персонала; для снижения негативного влияния от оборудования, отработавшего свой нормативный срок, — инспекции (экспертиза промышленной безопасности); для совершенствования организации производства — сертификация систем менеджмента качества [2].

По распоряжению Президента Российской Федерации от 31.12.91 №136-рп для научно-технической поддержки надзорной деятельности, координации работ и исследований, направленных на обеспечение промышленной безопасности, а также проведения независимой экспертизы и оценки безопасности промышленных производств был организован Научно-технический центр по безопасности в промышленности (в дальнейшем преобразован в ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»), который создал «Систему экспертизы и аккредитации в области промышленной безопасности».

В 2006 г. с передачей Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (далее – Ростехнадзор) широкого спектра полномочий в области промышленной, экологической, энергетической безопасности, безопасности гидротехнических сооружений, безопасности строительства производится унификация всех процедур оценки соответствия. В связи с этим на основе «Системы экспертизы и аккредитации в области промышленной безопасности» была создана «Единая система оценки соответствия на объектах, подконтрольных Ростехнадзору», которая в дальнейшем была преобразована в «Единую систему оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве» (ЕС ОС). На ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» были возложены функции

Центрального органа (Органа по аккредитации, Координирующего органа) ЕС ОС [3].

Главной целью ЕС ОС является обеспечение промышленной, экологической, ядерной и радиационной безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

Основные направления деятельности ЕС ОС:

– Совершенствование и актуализация правовой нормативной и методической базы обеспечения промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве с учётом формирования нового законодательства в сфере технического регулирования.

– Научно-методическое обеспечение совершенствования надзорной и контрольной деятельности Ростехнадзора.

– Координация деятельности и совершенствование ЕС ОС.

– Координация работ по созданию ЕС ОС.

– Изучение международного опыта в области функционирования надзорных органов и подтверждения компетентности органов по оценке соответствия.

– Издание официальных нормативных документов Ростехнадзора, справочно-информационное обеспечение организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

Основные цели ЕС ОС:

– Повышение уровня промышленной, экологической, ядерной и радиационной безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

– Установление общих принципов оценки соответствия объектов, подконтрольных Ростехнадзору.

– Оказание спектра услуг по подтверждению компетентности организаций.

– Повышение качества оказываемых услуг и доверия к деятельности органов оценки.

– Совершенствование уровня квалификации персонала и компетентности органов оценки соответствия.

– Актуализация методических документов и технических средств в соответствии с научно-техническим прогрессом и проверка их на применимость при оценке соответствия.

Основные задачи ЕС ОС:

– Проведение добровольной аккредитации органов оценки соответствия на базе единых требований.

– Гармонизация правил и процедур ЕС ОС с требованиями и критериями международных и европейских стандартов по оценке соответствия.

– Аттестация персонала, осуществляющего работы по оценке соответствия.

– Аттестация лабораторий, методических документов и технических средств, используемых при оценке соответствия.

– Формирование информационного обеспечения ЕС ОС и банка данных таких объектов, как аккредитованные органы оценки соответствия, аттестованный персонал, аттестованные лаборатории, методические документы и технические средства.

С целью подтверждения своей компетентности на международном уровне ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» прошло процедуру проверки на соответствие международным требованиям и заключило контракт с Европейским сотрудничеством по аккредитации (ЕА).

В настоящее время ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» является единственным в России органом по аккредитации, признанным ЕА.

Схема участников деятельности по аккредитации в ЕС ОС приведена на рис. 2.

В рамках ЕС ОС функционируют различные органы оценки соответствия, оказывающие услуги предприятиям и организациям на договорной основе: органы по сертификации систем менеджмента качества (СМК); органы по сертификации продукции (ОСП); независимые органы

по аттестации (сертификации) персонала (НОАП); независимые органы по аттестации (сертификации) экспертов (НОА); экспертные организации; инспекционные органы; лаборатории неразрушающего контроля (ЛНК); лаборатории разрушающих и других видов испытаний; электролаборатории; аналитические лаборатории; лаборатории, осуществляющие испытания продукции.

Для оценки компетентности персонала независимой стороной можно воспользоваться услугой НОА или НОАП, которые в случае положительной сертификации персонала выдают сертификат (удостоверение), признаваемый на территории Российской Федерации и в странах Европы.

Эффективный метод оценки качества работы предприятия — сертификация системы менеджмента качества, которую проводят аккредитованные в ЕС ОС органы по сертификации СМК.

Оценку качества выпускаемой продукции могут проводить аккредитованные в ЕС ОС органы по сертификации продукции (технических устройств) или инспекционные организации совместно с аккредитованными испытательными лабораториями. Состояние технических устройств (ТУ), зданий и сооружений на ОПО оценивают экспертные организации, которые также проводят экспертизу промышленной безопасности: проектной документации на расширение, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию ОПО; оценку соответствия проектной документации на строительство, реконструкцию, капитальный ремонт требованиям промышленной безопасности; декларации промышленной безопасности и документов в части анализа риска ОПО; документов, связанных с эксплуатацией ОПО. Экспертизу промышленной безопасности ТУ, зданий и сооружений на ОПО проводят экспертные организации совместно с испытательными лабораториями.

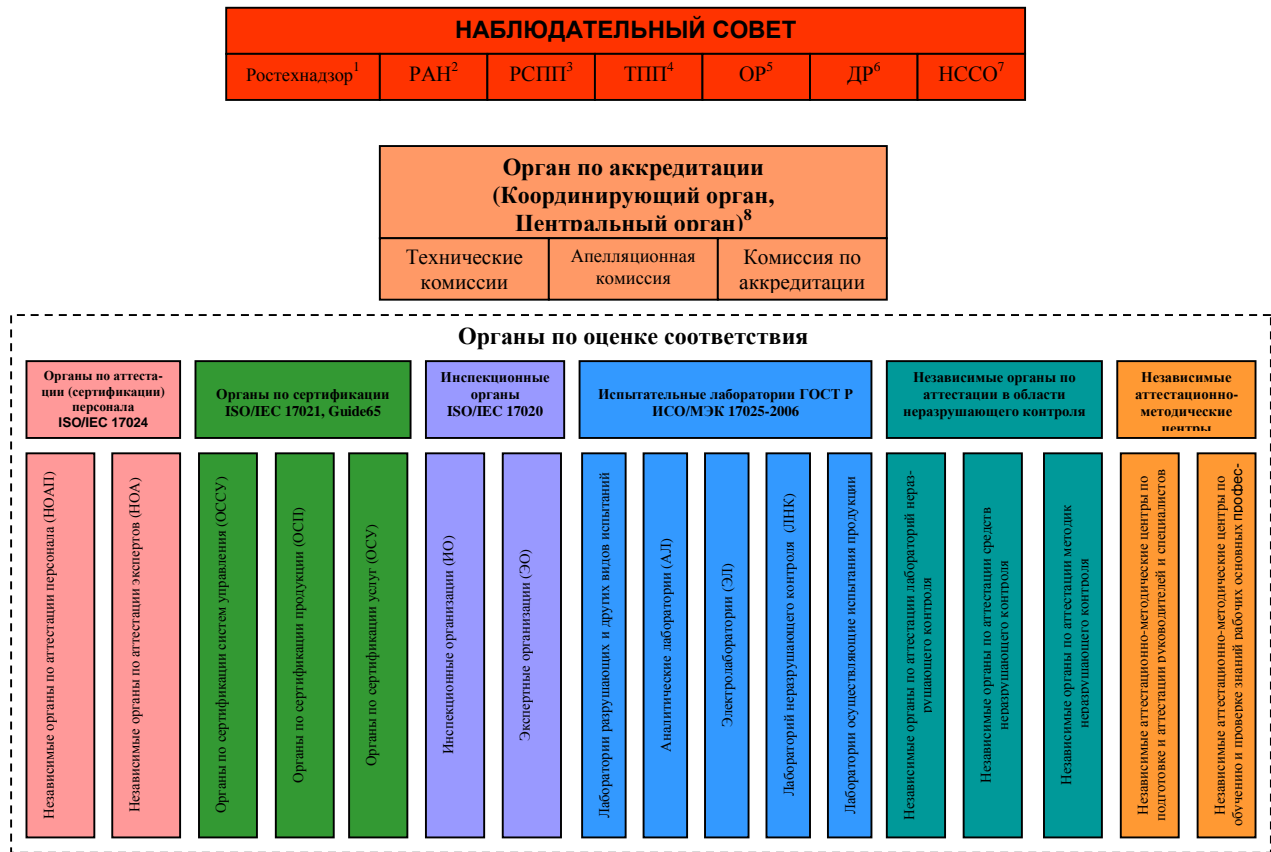


Рис.2. Участники деятельности по аккредитации в «Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве»:  
 1 - Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору; 2 - Российская академия наук; 3 - Российский союз промышленников и предпринимателей; 4 - Торгово-промышленная палата Российской Федерации; 5 - Опора России; 6 - Деловая Россия; 7 - Национальный союз страховщиков ответственности; 8 - Функции Органа по аккредитации выполняет ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»

Инспекционные организации кроме оценки качества выпускаемой продукции независимой стороной проводят контроль оказываемых услуг, проверяют состояние организации и её организационно-техническую готовность к выполнению определённых работ или услуг.

Компетентность участников «Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и

строительстве» определяется в соответствии с требованиями, установленными в документах по аккредитации участников ЕС ОС, устанавливающих общие правила, положения и требования к объектам и органам по аккредитации, и имеющие обозначение СДА – «Система документов по аккредитации».

Формы оценки соответствия, проводимые в рамках ЕС ОС, приведены на рис. 3.

<b>Орган по аккредитации</b>
<b>Форма оценки соответствия, проводимая органом по аккредитации: аккредитация</b>
<b>Органы оценки соответствия</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• органы по аттестации (сертификации) персонала: независимые органы по аттестации персонала, независимые органы по аттестации экспертов;</li> <li>• органы по сертификации продукции;</li> <li>• органы по сертификации услуг;</li> <li>• органы по сертификации систем управления;</li> <li>• испытательные лаборатории: лаборатории неразрушающего контроля, лаборатории разрушающих и других видов испытаний, аналитические лаборатории, электролаборатории, лаборатории, осуществляющие испытания продукции;</li> <li>• инспекционные органы: экспертные организации, инспекционные организации;</li> <li>• независимые органы по аттестации лабораторий неразрушающего контроля;</li> <li>• независимые органы по аттестации средств неразрушающего контроля;</li> <li>• независимые органы по аттестации методических документов по неразрушающему контролю;</li> <li>• независимые аттестационно-методические центры: независимые аттестационно-методические центры по подготовке и аттестации руководителей и специалистов, независимые аттестационно-методические центры по обучению и проверке знаний рабочих основных профессий.</li> </ul>
<b>Формы оценки соответствия, проводимые органами оценки соответствия: аттестация, сертификация, испытания, измерения, контроль, анализ, экспертиза</b>
<b>Опасные производственные объекты</b>
<p>это предприятие, его цех, участок, площадка или другие производственные объекты на его территории, на которых:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• получаются, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества (воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные; вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды);</li> <li>• используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 градусов Цельсия;</li> <li>• используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскапаторы, канатные дороги, фуникулёры;</li> <li>• получаются расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;</li> <li>• ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.</li> </ul>

Рис. 3. Формы оценки соответствия, проводимые в рамках «Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве»

Работая на современном рынке услуг по оценке соответствия на опасных производственных объектах, некоторые организации стремятся расширить спектр оказываемых услуг путём открытия несколько органов оценки соответствия на базе одной организации.

Для успешной работы органов оценки соответствия ЕС ОС в современных условиях необходимо периодически проводить исследования с целью совершенствования действующих систем управления.

Проведение исследований должно осуществляться в соответствии с выбранной целью и в определённой последовательности.

Исследования являются составной частью менеджмента органов оценки соответствия ЕС ОС и направлены на совершенствование основных характеристик процесса управления.

Результаты проведённых исследований систем управления органов оценки

соответствия ЕС ОС, созданных на базе системы управления НОУ УЦ «Самара», показывают, что система управления характеризуется одновременным функционированием нескольких автономных систем, подчиняется ряду требований и сопряжено с рядом проблем:

– дублирование отдельных требований порождает внедрение нескольких процедур, одинаковых по целям (например, процедуры управления документацией и записями; процедуры управления внутренними аудитами и др.);

– возникновение противоречий между приоритетностью в требованиях различных систем менеджмента (например, статус и роль представителей руководства по качеству в каждом органе оценки соответствия; ресурсы на обеспечение качества и др.);

– отсутствие единого действенного механизма или наличие одновременно нескольких, но плохо сочетающихся между собой, механизмов реагирования на дес-

стабилизирующие факторы внешней и внутренней среды организации.

Совершенствование деятельности органов оценки соответствия «Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве» предусматривает:

- снижение негативных факторов, влияющих на состояние опасных производственных объектов;
- организацию деятельности внутри предприятия посредством описания взаимодействия между отдельными исполнителями и подразделениями;
- осуществление постоянного мониторинга процессов посредством различных механизмов: процесс постоянного улучшения, внутренний аудит, что позволяет выявлять несоответствия и оперативно устранять их;
- предоставление дополнительного преимущества перед конкурентами: соответствие международным стандартам выводит бизнес на качественно новый уровень [4].

Одним из актуальных методов совершенствования системы управления организации, на базе которой функционирует несколько органов оценки соответствия, является интеграция всех процессов, реализуемых в компании, в единую кон-

солидированную систему, представляющую собой целостный механизм управления организацией.

Создание интегрированной системы менеджмента в органах оценки соответствия - сложная, но необходимая работа, с помощью которой могут быть решены задачи по повышению качества оценки соответствия в ЕС ОС.

### Библиографический список

1. Барвинок, В. А. Менеджмент качества в машиностроении: системы, методы, инструменты [Текст]: учеб. пособие // В. А. Барвинок, В. Е. Годлевский, Е. А. Стрельников; под общ. ред. чл.-кор. РАН В. А. Барвинка. - М: Наука и технологии, 2008. - 384 с.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21.06.1997. №116-ФЗ.
3. О единой национальной системе аккредитации: указ Президента Российской Федерации от 24.01.2011 г. № 86.
4. Печёркин А. С. Перспективы развития Единой системы оценки соответствия на объектах, подконтрольных Ростехнадзору [Текст] / А. С. Печёркин // Безопасность труда в промышленности. - 2009. - № 1. - С. 9-10.

## INCREASE OF THE ROLE OF CONFORMITY ASSESSMENT AT THE FACILITIES CONTROLLED BY THE FEDERAL SERVICE ON ECOLOGICAL, TECHNOLOGICAL AND NUCLEAR SUPERVISION

©2012 V. A. Barvinok, L. A. Naumov, A. V. Dolgikh

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The analysis of methods of assessing the conformity of hazardous production facilities supervised by Rostekhnadzor is carried out. Measures to improve the quality of conformity assessment, the role of which is of great importance in reducing the influence of negative factors in the field of industrial safety are developed.

*Audit, monitoring, accreditation, certification, measurement, control, test, continuous innovation.*

## Информация об авторах

**Барвинок Виталий Алексеевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Область научных интересов: физика плазмы, математическое моделирование, тепловые процессы, деформационные процессы, газотермическое напыление, вакуумное напыление, надёжность, ресурс, авиакосмическая техника, менеджмент качества.

**Наумов Лев Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: физика плазмы, математическое моделирование, тепловые процессы, деформационные процессы, газотермическое напыление, вакуумное напыление, надёжность, ресурс, авиакосмическая техника, менеджмент качества.

**Долгих Анна Владимировна**, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [smk\\_samara@mail.ru](mailto:smk_samara@mail.ru). Область научных интересов: математическое моделирование, системы менеджмента качества, оценка соответствия.

**Barvinok Vitaly Alekseevich**, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical science, professor, head of the department of aircraft construction and quality management in engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [barvinok@ssau.ru](mailto:barvinok@ssau.ru). Area of research: physics of plasma, mathematical modelling, thermal processes, deformation processes, gas-thermal spraying, vacuum spraying, reliability, resource, aerospace engineering, quality management.

**Naumov Lev Aleksandrovich**, candidate of technical science, senior lecturer of the department of aircraft construction and quality management in engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: physics of plasma, mathematical modelling, thermal processes, deformation processes, gas-thermal spraying, vacuum spraying, reliability, resource, aerospace engineering, quality management.

**Dolgikh Anna Vladimirovna**, assistant of the department of aircraft construction and quality management in engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [smk\\_samara@mail.ru](mailto:smk_samara@mail.ru). Area of research: mathematical modeling, quality management systems, assessment of conformity.



УДК 004.8  
ББК 65.421

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ТОВАРООБОРОТА РОЗНИЧНОГО ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© 2012 А. У. Ибрагимов, Л. А. Ибрагимова, Г. И. Гильмуллина

Ижевский государственный технический университет

Приведены группы факторов, влияющих на товарооборот розничного торгового предприятия. Описаны алгоритмы анализа и прогнозирования результатов деятельности розничного торгового предприятия с использованием искусственных нейронных сетей и методов нечёткой логики.

*Товарооборот, розничное торговое предприятие, группы факторов, искусственные нейронные сети, нечёткая логика, алгоритмы.*

Регулярная оценка товарооборота как одного из важных показателей деятельности розничного торгового предприятия позволяет оперативно реагировать на происходящие изменения и прогнозировать развитие торговых предприятий [1]. Оценка должна носить комплексный характер и осуществляться на основе определённых принципов, таких как системность, комплексность, достоверность, объективность, соответствие получаемого и желаемого результата, научность, оперативность.

Основная сложность анализа деятельности розничных торговых предприятий (РТП) заключается в том, что они относятся к динамическим социально-экономическим системам, зависящим от множества факторов внутренней и внешней среды предприятия. Более востребованными становятся алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии организационно-управленческих решений.

Для анализа и управления в социально-экономических системах используются различные методы, такие как метод экспертных оценок, теория массового обслуживания, статистические и другие методы эконометрики [2].

Отметим, что комплексный анализ в таком сложном по структуре информационном поле не поддаётся обработке указанными методами без определённых пре-

образований. Сложно также оценить влияние факторов друг на друга и их взаимосвязь. Методы искусственных нейронных сетей и нечёткой логики позволяют устранить отмеченные недостатки. В статье приведены рекомендации по совершенствованию процессов анализа и прогнозирования результатов деятельности розничных торговых предприятий с помощью данных методов.

Проведённый авторами экспертный опрос позволил выделить четыре группы факторов, сгруппированных по наиболее значимым свойствам [3]:

1. Характеристика магазина/торгового пространства. Эта группа факторов определяет его ассортиментную, ценовую политику, а также особенности логистики.

2. Расположение магазина (характеристики ареала). Под ареалом подразумевается территория вокруг магазина, находящаяся в пределах 10-минутной шаговой доступности от него. Эти факторы определяют потенциальный покупательский поток: его величину в целом, изменения в различные периоды дня, недели и т.д., платёжеспособность и предпочтения покупателей.

3. Транспортная и пешеходная доступность магазина. Эта группа факторов также определяет величину и изменения покупательского потока и, соответственно, товарооборот магазина.

4. Отношение покупателей к магазину (клиентские показатели). Данная группа определяет конкурентоспособность магазина и готовность покупателей делать покупки, влияя на покупательский поток, величину средней покупки.

Отметим, что факторы в каждой из данных групп весьма разноплановые и имеют различную размерность, единицы измерения и диапазон значений, что значительно осложняет комплексную работу с ними.

Для групп факторов «Характеристика магазина/торгового пространства» и «Расположение магазина (характеристики ареала)» предложен метод искусственных

нейронных сетей [4]. Преимущества данного инструмента заключаются в возможности установления скрытых зависимостей между входными данными сети и способности сети к обучению на основе предлагаемых данных. Входными параметрами при обучении нейронной сети являются нормализованные (отношение абсолютного значения фактора к максимальному значению ряда) значения факторов за периоды. Выходным показателем является удельный товарооборот за эти же временные интервалы. В табл. 1 представлен фрагмент нормализованной базы данных по факторам данной группы.

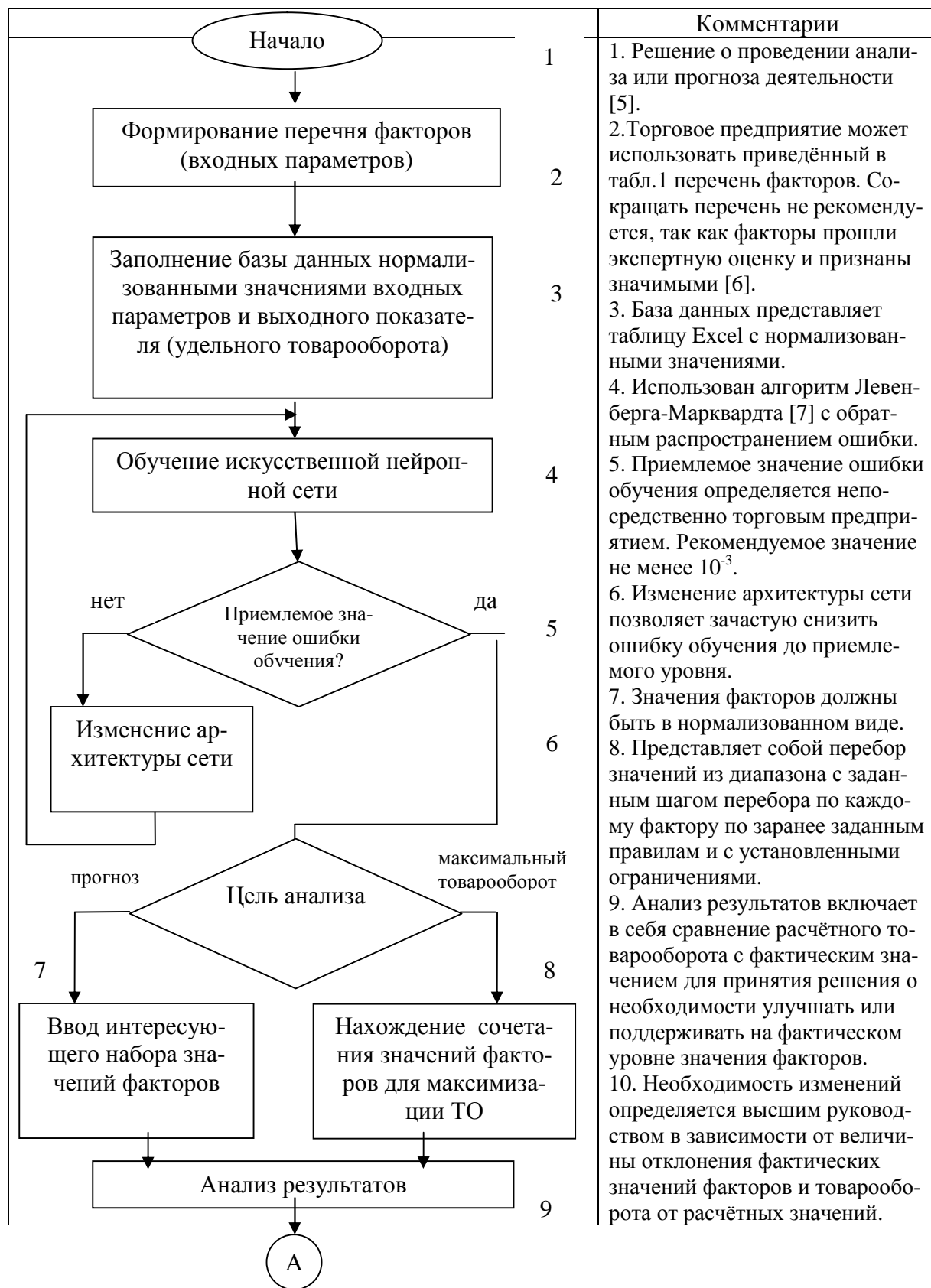
Таблица 1. Фрагмент нормализованной базы данных по группе «Характеристика магазина/торгового пространства»

Фактор \ Период, мес.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
Количество работников РТП, чел.	0,880	0,888	0,904	0,912	0,928	0,936	0,944	0,952	0,96	...
Товарные запасы в магазине, руб.	0,681	0,702	0,723	0,745	0,766	0,787	0,809	0,829	0,851	...
Доля постоянных покупателей, %	0,55	0,57	0,57	0,58	0,59	0,59	0,60	0,62	0,63	...
Широта ассортимента, шт.	0,833	0,917	0,875	0,875	0,896	0,896	0,875	0,875	0,917	...
Выполнение поставок, %	0,95	0,95	0,96	0,97	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	...
Коэффициент обновления основных фондов	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	...
Соотношение продовольственных и сопутствующих товаров в ассортименте, %	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	...
Соотношение площади, занимаемой торговым оборудованием, и площади торгового зала, %	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	...
Соотношение между площадью торгового зала и площадью складов и прочих помещений, %	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	...
Товарооборот, тыс.руб./кв.м	0,463	0,496	0,608	0,623	0,679	0,681	0,703	0,825	0,808	...

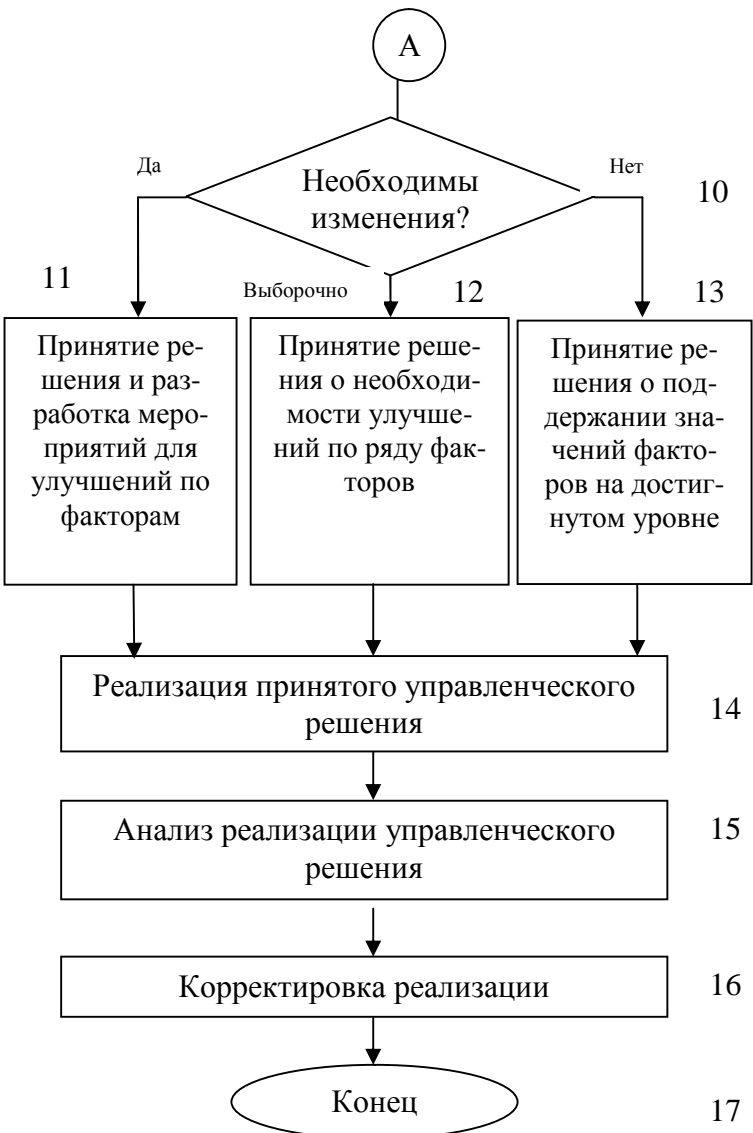
Рекомендации по использованию предложенного метода для анализа и прогнозирования результатов деятельности

розничного торгового предприятия представлены в виде блок-схемы с комментариями в табл 2.

Таблица 2. Рекомендации по анализу и прогнозированию результатов деятельности РТП для группы факторов «Характеристика торгового пространства магазина»



Окончание таблицы 2

Блок-схема	Комментарии
 <pre> graph TD     A((А)) --&gt; D{Необходимы изменения?}     D -- Да --&gt; B1[11]     D -- Выборочно --&gt; B2[12]     D -- Нет --&gt; B3[13]     B1 --&gt; R1[Принятие решения и разработка мероприятий для улучшений по факторам]     B2 --&gt; R2[Принятие решения о необходимости улучшений по ряду факторов]     B3 --&gt; R3[Принятие решения о поддержании значений факторов на достигнутом уровне]     R1 --&gt; R4[Реализация принятого управленческого решения]     R2 --&gt; R4     R3 --&gt; R4     R4 --&gt; R5[Анализ реализации управленческого решения]     R5 --&gt; R6[Корректировка реализации]     R6 --&gt; E((Конец))     </pre>	<p>11. Разработка мероприятий предполагает определение ответственных лиц, последовательности этапов, необходимых ресурсов, сроков исполнения и методов оценки результата работы.</p> <p>12. Решение о поддержании значений факторов на достигнутом уровне может быть, если:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) значения близки к требуемым;</li> <li>б) предприятие ограничено в средствах и возможностях для улучшений факторов.</li> </ul> <p>13. Мероприятия могут проводиться только по ряду факторов, если:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) часть факторов соответствует требуемым значениям;</li> <li>б) предприятие выбрало часть факторов как приоритетные.</li> </ul> <p>14. Реализация управленческого решения должна носить реальный и последовательный характер.</p> <p>15. Анализ реализации включает мониторинг по срокам и степени соответствия прогнозируемым результатам, а также выявление причин возможных несоответствий.</p> <p>16. Корректировка реализации должна быть основана на фактах.</p> <p>17. Проведение анализа должно носить периодический характер, поэтому окончание блок-схемы условно.</p>

Отметим, что представленный выше алгоритм описывает первый цикл использования методики торговым предприятием. При последующем использовании алгоритма ряд этапов можно опустить (этапы алгоритма 2-6), что значительно упрощает ее использование. Однако наполнение базы данных новыми значениями по факторам и периодическое переобучение нейронной сети полезно для повышения точности результатов анализа и прогноза.

Для группы факторов «Расположение магазина» принципиальная последо-

вательность элементов аналогична с учётом некоторых особенностей группы.

Для факторов, значения которых характеризуются субъективными оценками покупателей, таких как «Транспортная и пешеходная доступность магазина» и «Отношение покупателей к магазину (клиентские показатели)», предлагается использовать методы нечёткой логики [8], позволяющие учитывать данную особенность. В табл. 3 приведён пример перечня входных параметров и выходного показателя по группе «Пешеходная и транспортная доступность магазина».

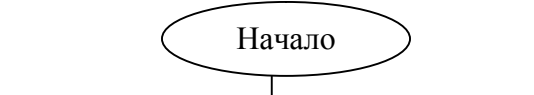
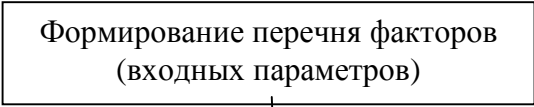
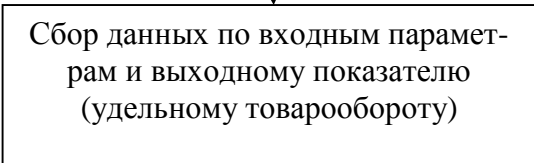
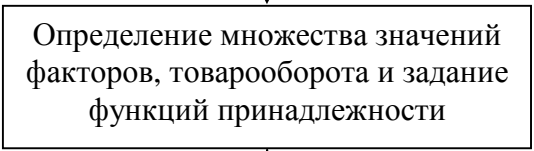

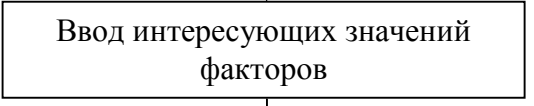
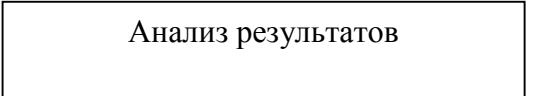
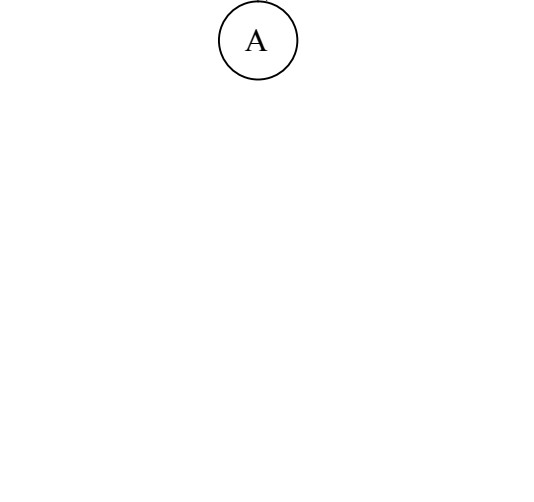
Таблица 3. Фрагмент базы данных по группе «Пешеходная и транспортная доступность»

Магазин	Благоустроенность прилегающей территории, балл	Обеспеченность парковкой, машиномест	Пробки, балл	Количество маршрутов общественного транспорта, шт.	Удаленность остановки общественного транспорта, мин.	Плотность транспортной сети, км/кв.км	Сезон, мес.	Товарооборот, тыс.руб./кв.м
Магазин «А»	4,11	50	2,3	11	2	6,7	7	36,6
	...	...	...	...	...	...	...	
Магазин «Б»	3,82	70	1,2	8	5	7,6	7	12,6
	...	...	...	...	...	...	...	

Рекомендации по использованию метода нечёткой логики в целях анализа и прогнозирования результатов деятельно-

сти РТП приведены в виде блок-схемы и пояснений в табл. 4.

Таблица 4. Рекомендации по анализу и прогнозированию результатов деятельности РТП для группы факторов «Пешеходная и транспортная доступность»

Блок-схема	Комментарии
	1. Решение о проведении анализа или прогноза деятельности [9].
	2. Перечень факторов может быть дополнен или сокращён в зависимости от целей анализа. По факторам, представленным в табл. 3, проведена экспертная оценка, поэтому исключение факторов может снизить точность результатов прогноза. Расширение перечня факторов может значительно увеличить базу правил.
	3. Используются в основном результаты опроса покупателей.
	4. Если розничное торговое предприятие использует предложенные рекомендации без изменений, то данный этап можно опустить. Если предприятие иначе задаёт множество значений и использует иные функции принадлежности, то следует воспользоваться общей методологией, изложенной в [10].
	5. Редактирование базы правил возможно при уточнении входящих в неё правил для учёта особенностей данного торгового предприятия, накопленного опыта, экспертного мнения его специалистов.
	6. Вводится интересующий набор значений для прогнозирования товарооборота.
	7. Анализ результатов включает в себя сравнение расчётного товарооборота с фактическим значением для принятия решения о необходимости улучшать или поддерживать на фактическом уровне значения
	

Окончание таблицы 4

Блок-схема	Комментарии
<pre> graph TD     A((А)) --&gt; D{Необходимы изменения?}     D -- Да (9) --&gt; B1[Принятие решения и разработка мероприятий для улучшений по факторам]     D -- Выборочно (10) --&gt; B2[Принятие решения о необходимости улучшений по ряду факторов]     D -- Нет (11) --&gt; B3[Принятие решения о поддержании значений факторов на достигнутом уровне]     B1 --&gt; C[Реализация принятого управленческого решения]     B2 --&gt; C     B3 --&gt; C     C --&gt; D1[Анализ реализации управленческого решения]     D1 --&gt; D2[Корректировка реализации]     D2 --&gt; E((Конец))     </pre>	<p>8. Необходимость изменений определяется высшим руководством в зависимости от величины отклонения фактических значений факторов и товарооборота от расчётных значений.</p> <p>9. Разработка мероприятий предполагает определение ответственных лиц, последовательности этапов, необходимых ресурсов, сроков исполнения и методов оценки результата работы.</p> <p>10. Решение о поддержании значений факторов на достигнутом уровне может быть, если:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) значения близки к требуемым;</li> <li>б) предприятие ограничено в средствах и возможностях для улучшений факторов</li> </ul> <p>11. Мероприятия могут проводиться только по ряду факторов, если:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) часть факторов соответствует требуемым значениям;</li> <li>б) предприятие выбрало часть факторов как приоритетные.</li> </ul> <p>12. Реализация управленческого решения должна носить реальный и последовательный характер.</p> <p>13. Анализ реализации включает мониторинг по срокам и степени соответствия прогнозируемым результатам, а также выявление причин возможных несоответствий.</p> <p>14. Корректировка реализации должна быть основана на фактах.</p> <p>15. Анализ деятельности должен носить периодический характер, поэтому окончание блок-схемы условно.</p>

Периодическое использование рекомендаций, представленных в табл. 2, позволяет опустить некоторые этапы, такие как пп.2-5 блок-схемы. При этом можно отказаться только от одного или сразу нескольких этапов, что даёт множество вариантов использования в зависимости от целей управленческого анализа и результатов мониторинга текущего состояния розничного торгового предприятия.

Для группы факторов «Отношение покупателей к магазину (клиентские показатели)» также рекомендуется использовать методы нечёткой логики, поэтому алгоритм практически аналогичен с учётом некоторых особенностей.

При внедрении предложений в организационно-экономический механизм деятельности розничного торгового предприятия необходимо учитывать степень технической и методологической подготовленности объекта к применению рекомендаций и возможностей реализации предложений по результатам анализа. Реализация предложенных алгоритмов возможна в программной среде Matlab.

Апробация предложений проведена на базе одной из продуктовых розничных торговых сетей г. Ижевска. Внедрение рекомендаций позволило увеличить товарооборот магазинов и повысить конкурентоспособность предприятия.

Представленный подход может применяться и на торговых предприятиях иного профиля. Для этого необходимо уточнить перечень факторов, чтобы отразить особенности исследуемой сферы торговли и учесть цели анализа.

Таким образом, можно утверждать, что предложенные блок-схемы, содержащие рекомендации по анализу и прогнозированию результатов деятельности РТП, позволяют:

- с достаточной точностью прогнозировать динамику как отдельных параметров, влияющих на товарооборот, так и их кластеров;
- получить интеллектуальную поддержку управленческих решений, которая может учитывать происходящие изменения

внешней и внутренней среды РТП благодаря способности нейронных сетей к обучению. Указанная особенность является преимуществом предложенного метода;

- учитывать субъективность потребительских оценок для групп факторов, в основе которых находится мнение покупателей.

#### Библиографический список

1. Пожидаева, А. И. Управление продовольственным магазином: семь шагов к успеху [Текст] / А. И. Пожидаева, И. А. Процко, Н. Ю. Королева - Минск: ООО «Издательство Гревцова», 2008.- 247с.

2. Фомин, Г. П. Математические методы и модели в коммерческой деятельности [Текст]: учеб. / Г. П. Фомин. – М.: Финансы и статистика, 2005.- 616с.

3. Ibragimova, L. A. Factors influencing the efficiency of retail trade enterprise [Text] / L. A. Ibragimova, G. I. Gilmullina // Education Quality – 2010: the collection of papers of scient.- research. conf.. – Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2010. – P.46-53.

4. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / И. Д. Рудинский; пер. с польского. - М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 с.

5. Гильмуллина, Г. И. Применение нейронных сетей для оценки эффективности деятельности торгового предприятия [Текст] / Г. И. Гильмуллина, Л. А. Ибрагимова // Системный анализ и семиотическое моделирование: тр. I Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Казань: Фэн, 2011. – С. 109-112.

6. Гильмуллина, Г. И. Экспертная оценка показателей эффективности деятельности торговых предприятий [Текст] / Г. И. Гильмуллина // Актуальные проблемы товароведения потребительских товаров и учебно-методические аспекты подготовки высококвалифицированных кадров: сб. науч. тр. - М.: Гриф и К, 2010.- С. 44-50.

7. Levenberg, K. A Method for the Solution of Certain Problems in Last Squares. Quart. Appl. Math. 1944. Vol. 2. PP. 164—168.



8. Гуляшинов, А. Н. Теория принятия решений в сложных социотехнических системах [Текст]: учеб. пособие. / А. Н. Гуляшинов, В. А. Тененев, Б. А. Якимович – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2005. – 280 с.

9. Гильмуллина, Г. И. Разработка модели оценки пешеходной и транспортной доступности торгового предприятия на основе нечеткого вывода [Текст] / Г. И.

Гильмуллина, О. А. Гужева // К компетенциям через инноватику: сб. материалов науч.-иссл. конф. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011.

10. Аверкин, А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун. – М.: Наука, 1986. – 312с.

## USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR RETAIL TRADE ENTERPRISE GOODS TURNOVER ANALYSIS AND FORECAST

© 2012 A. U. Ibragimov, L. A. Ibragimova, G. I. Gilmullina

Izhevsk State Technical University

Groups of factors influencing goods turnover of a retail trade enterprise are given. Analysis algorithms and forecasting of the results of activity of a retail trade enterprise with the use of artificial neural networks and fuzzy logic methods are described.

*Goods turnover, retail trade enterprise, groups of factors, artificial neural networks, fuzzy logic, algorithms.*

### Информация об авторах

**Ибрагимов Анвар Усманович**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управления качеством», Ижевский государственный технический университет. E-mail: [UK@istu.ru](mailto:UK@istu.ru). Область научных интересов: разработка и исследование моделей и математических методов анализа экономических процессов и систем в торговле.

**Ибрагимова Лилия Анваровна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Управления качеством», Ижевский государственный технический университет. E-mail: [lilia\\_ibr@mail.ru](mailto:lilia_ibr@mail.ru). Область научных интересов: информационно-аналитические системы управления ресурсами торгового предприятия.

**Гильмуллина Гузьяль Ильдаровна**, старший преподаватель, Ижевский государственный технический университет. E-mail: [guzyal\\_gaisina@mail.ru](mailto:guzyal_gaisina@mail.ru). Область научных интересов: разработка и исследование моделей и математических методов анализа экономических процессов и систем в торговле.

**Ibragimov Anvar Usmanovich**, Cand.Tech.Sci., professor, Izhevsk State Technical University. E-mail: [UK@istu.ru](mailto:UK@istu.ru). Area of research: working out and research of models and mathematical methods of the analysis of economic processes and systems in trade.

**Ibragimova Liliya Anvarovna**, Cand.Econ.Sci., associate professor, Izhevsk State Technical University. E-mail: [lilia\\_ibr@mail.ru](mailto:lilia_ibr@mail.ru). Area of research: working out and research of models and mathematical methods of the analysis of economic processes and systems in trade.

**Gilmullina Guzyal Ildarovna**, senior lecturer, Izhevsk State Technical University. E-mail: [guzyal\\_gaisina@mail.ru](mailto:guzyal_gaisina@mail.ru). Area of research: working out and research of models and mathematical methods of the analysis of economic processes and systems in trade.

ББК 65.050.2

## ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

© 2012 А. У. Ибрагимов, Л. А. Ибрагимова, М. В. Караваева

Ижевский государственный технический университет

Рассматривается применение метода нечёткой логики для оценки компетентности персонала организации. Представлены результаты апробации данной методики на розничном торговом предприятии г. Ижевска.

*Нечёткая логика, оценка персонала, компетентность.*

Согласно ГОСТ Р ИСО 9001-2008 [1] персонал, выполняющий работу, влияющую на соответствие продукции требованиям, должен быть компетентным в соответствии с полученным образованием, подготовкой, навыками и опытом. Для выполнения этого требования необходима система непрерывной подготовки персонала, позволяющая принимать во внимание: условия специфической деятельности конкретного предприятия, согласование потребностей работников и предприятия, рациональное распределение ресурсов, развитие личностно-профессионального потенциала сотрудников. Анализ различных источников литературы позволяет сделать вывод, что оценка является системообразующей функцией управления персоналом, поскольку именно на основе её результатов принимаются решения для реализации прочих функций [2]. Отбор и оценка персонала становятся первостепенным фактором успеха в наше время, когда конкурентоспособность компании определяется в первую очередь уровнем квалификации сотрудников [3].

В современной практике применяются множество различных методов оценки, в том числе анкетирование, интервью, тестирование, описательный метод, метод классификации, парное сравнение, рейтинговый метод, метод «360 градусов оценки», деловые игры, модели компетентности и т.д. [4, 5, 6]. Каждый из мето-

дов обладает своими достоинствами и недостатками, но эффективны они только в составе единой системы управления персоналом. Необходимо, чтобы методология оценки, обеспечивающая базу для реализации функций управления персоналом:

- была основана на объективной информации и давала объективные оценки кандидатов;
- стимулировала тех, кто производит отбор, к обоснованию решения с учётом согласованной системы критериев;
- обеспечивала взаимопонимание сторон при оценке персонала [7];
- обеспечивала реализацию обоснованных управленческих решений.

При анализе результатов оценки персонала возникает определенная степень нечёткости. В качестве метода для реализации системного подхода к оценке персонала предлагается использовать нечёткую логику, математический аппарат которой позволяет построить модель объекта, основываясь на нечётких рассуждениях и правилах. Важнейшее условие создания такой модели состоит в том, чтобы перевести нечёткие, качественные оценки, применяемые человеком, на язык математики, понятный вычислительной машине [8, 9]. Исследования в сфере применения нечёткой логики в социоэкономических системах [10, 11, 12] позволяют говорить

о возможности её использования и в целях оценки персонала.

На рис. 1 представлена предлагаемая последовательность этапов оценки компетентности специалистов предприятия на основе математического аппарата нечёткой логики.

Остановимся подробнее на каждом из этапов, представленных на рис. 1.

1. *Определение целевой функции*, описывающей зависимость входных и выходных переменных системы оценки персонала:

$$K(y_1, y_2, \dots, y_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где  $K$  – уровень компетентности,

$x_1-x_n$  – входные переменные системы оценки,

$y_1-y_m$  – выходные переменные.

2. *Определение перечня должностей предприятия (выходных переменных  $y_m$ )*. На данном этапе необходимо определить перечень необходимых должностей предприятия  $y_m$ , где  $m$  – количество должностей. В случае большого количества должностей целесообразно объединить их в группы по одному признаку.

3. *Определение оцениваемых показателей (лингвистических переменных  $x_n$ )*. Цель этапа – разработка перечня оцениваемых показателей (лингвистических переменных  $x_n$ , где  $n$  – количество оцениваемых показателей) исходя из требований к выделенным должностям (группам должностей). Требования к должности должны быть реалистичными и допускать определённую степень гибкости. Чаще всего данные требования указываются в должностных инструкциях работников, в стандартах и других нормативных документах предприятия. К числу наиболее распространённых оцениваемых показателей относятся: возраст, опыт работы, образование, состояние здоровья и внешний вид, личные и деловые качества. Перечень показателей должен быть составлен таким образом, чтобы он отражал необходимые требования к должности и не был слишком объёмным, поскольку это затрудняет объективность оценки и принятие решения о приёме кандидата.

4. *Определение терм-множества входных значений  $x_n$  и задание его функциями принадлежности  $A_{in}$* . На данном этапе необходимо определить базовое терм-множество каждой лингвистической переменной  $x_n$ . Множество значений зависит от оцениваемого показателя. Например, для оценки личных качеств удобнее использовать диапазон значений  $x_n = [1;5]$ , т.к. в большинстве тестов и экспертных оценок данных показателей используется именно 5-балльная система. Далее выделить необходимое количество термов и задать их функциями принадлежности  $A_{in}$ , где  $i$  – количество термов  $n$ -го входного показателя. Для описания качественных показателей, таких как коммуникабельность, внешний вид и т.д., можно использовать термы: «Высокий», «Средний», «Низкий», заданные гауссовыми функциями принадлежности.

5. *Определение терм-множества выходных переменных  $y_m = [0;100]$  и задание его функциями принадлежности  $B_{jm}$* . Цель этапа – определение терм-множества выходных переменных  $y_m$ . Оптимальным вариантом является множество  $y_m = [0;100]$ . Поскольку выходные переменные будут отражать степень соответствия компетентности кандидата различным должностям предприятия, для вывода этих переменных удобнее использовать проценты, т.е. множество  $[0;100]$ . Далее необходимо определить термы выходных переменных и задать их функциями принадлежности  $B_{jm}$ , где  $j$  – количество термов  $m$ -го выходного показателя. Наиболее оптимальными являются универсальные функции принадлежности гауссова типа, состоящие из трех термов: «Нет», «Может быть» и «Да», которые описываются следующими формулами:

$$m_{нет}(y) = \exp\left[-\left(\frac{y}{12}\right)^2\right]; \quad (2)$$

$$m_{мо}(y) = \exp\left[-\left(\frac{y-50}{12}\right)^2\right]; \quad (3)$$

$$m_{да}(y) = \exp\left[-\left(\frac{y-100}{12}\right)^2\right]. \quad (4)$$

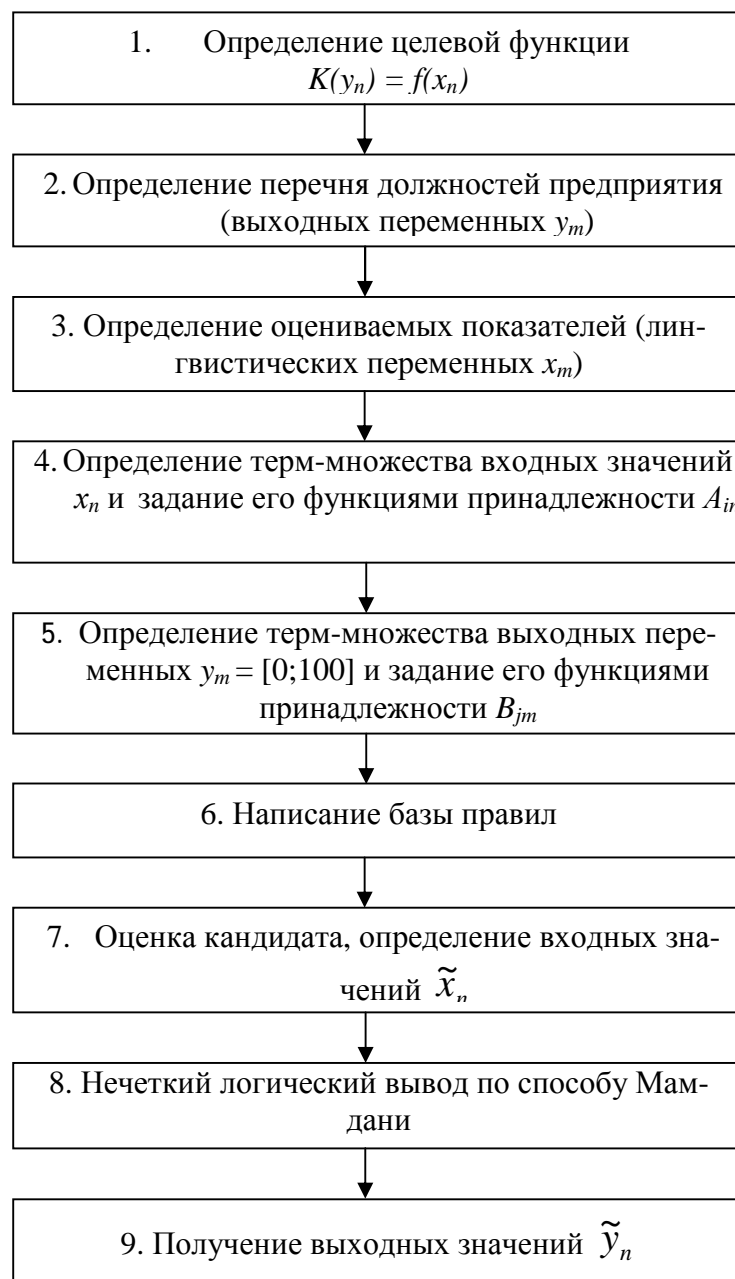


Рис. 1. Оценка персонала с помощью нечёткой логики

6. *Написание базы правил.* Необходимо сформировать базу правил, отражающих требования к определённым должностям предприятия. Правила задать в следующем виде: *если*  $x_1$  есть  $A_1$  и  $x_2$  есть  $A_2$  и ... и  $x_n$  есть  $A_i$ , *то*  $y_1$  есть  $B_1$  и  $y_2$  есть  $B_2$  и  $y_m$  есть  $B_j$ , где  $A$  и  $B$  – термы лингвистических переменных, построенные в пространстве входных значений  $x$  и выходных значений  $y$ , где  $n$  – количество входных переменных (оцениваемых показателей),  $m$  – количество выходных переменных (должностей).

7. *Оценка кандидата, определение входных значений  $\tilde{x}_n$ .* На этом этапе производится оценка кандидата на соответствие выбранным показателям с помощью принятых в организации методов (интервью, анкетирование и т.д.).

8. *Нечёткий логический вывод по способу Мамдани* (рис. 2). Наиболее используемыми являются нечёткие выводы по способам Мамдани и Сугено. В нечётком выводе типа Мамдани значения выходной переменной задаются нечёткими термами, в выводе типа Сугэно – как ли-

нейная комбинация входных переменных [13]. Поскольку в данном алгоритме выходные переменные (степени соответствия должностям) невозможно представить как линейную комбинацию входных переменных (характеристик персонала), а задание их нечёткими термами: «да», «нет», «может быть» наиболее оптимально, используем логический вывод по способу Мамдани.

9. *Получение выходных значений*  $\tilde{y}_n$ . Выходные значения  $\tilde{y}_n$  выводятся в процентах, которые соответствуют степени компетентности оцениваемого сотрудника различным должностям (группам должностей) предприятия.

Предложенная последовательность позволяет достаточно оперативно и объективно провести оценку сотрудников предприятия и может быть использована как при отборе персонала, так и при его периодической аттестации. Представленные выше рекомендации необходимо реализовывать на базе требований к персоналу и с учётом штатного состава конкретного предприятия.

Ниже описаны результаты апробации рекомендаций на примере розничного торгового предприятия г. Ижевска.

В рамках апробации данного подхода на торговом предприятии была опреде-

лена целевая функция, описывающая зависимость оцениваемых показателей и выходных переменных системы оценки:

$$K(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6), \quad (5)$$

где  $K$  – уровень компетентности,  
 $x_1$  – возраст кандидата;  
 $x_2$  – внешний вид;  
 $x_3$  – уровень образования;  
 $x_4$  – опыт работы в данной сфере;  
 $x_5$  – коммуникабельность;  
 $x_6$  – характер, поведение.

Далее перечислены категории должностей штатного состава торгового предприятия (табл. 1):

$y_1$  – категория 1;  
 $y_2$  – категория 2;  
 $y_3$  – категория 3;  
 $y_4$  – категория 4;  
 $y_5$  – категория 5;  
 $y_6$  – категория 6.

Данные категории сотрудников были сформированы на основании принятой в организации кадровой политики, уровня ответственности работников и совпадения требований к персоналу.

Описание входных и выходных переменных системы оценки, а также варианты ввода этих переменных приведены в табл. 2.

Таблица 1. Категории сотрудников розничного торгового предприятия

Категория	Должность
Первая	Уборщица, кухонный работник, оператор чистоты торгового зала, дворник, менеджер парковки
Вторая	Повар, пекарь, кондитер, обвальщик, изготовитель пищевых полуфабрикатов, фасовщица, менеджер на выгрузку
Третья	Менеджер торгового зала, сотрудник СПП
Четвёртая	Продавец-консультант производственного цеха, продавец-консультант в торговом зале, продавец-кассир, продавец-кассир по сбору выручки, старший сотрудник СПП
Пятая	Заместитель директора магазина по направлениям, старший менеджер, товаровед, заместитель заведующего производством, технолог, бухгалтер-калькулятор
Шестая	Директор магазина, заведующая производством

Таблица 2. Входные и выходные переменные системы оценки персонала торгового предприятия

Обозначение переменной	Наименование переменной	Терм-множество	Варианты ввода
$x_1$	Возраст	Молодой, средний, старший	18 – 60 лет
$x_2$	Внешний вид	Низкий, средний, высокий	2 - 5 баллов
$x_3$	Образование	Школа, среднее профессиональное, высшее	1 – школа, 2 – среднее проф., 3 - высшее
$x_4$	Опыт работы	Низкий, средний, высокий	Количество лет (0, 1, 2 и т.д.)
$x_5$	Коммуникабельность	Низкая, средняя, высокая	2 – 5 баллов
$x_6$	Характер, поведение	Низкий, средний, высокий	2 – 5 баллов
$y_{1-6}$	Группа должностей 1 – Группа должностей 6	Нет, может быть, да	0 – 100%

Оцениваемые показатели и категории должностей являются лингвистическими переменными. Для описания каждой лингвистической переменной были заданы функции принадлежности гауссова типа, состоящие из трёх термов. Термы каждой переменной также представлены в табл. 2.

База правил для оценки персонала включает 256 правил следующего вида:

$R_1$ : Если «возраст» - «молодой» и «внешний вид» - «средний» и «образование» - «школа» и «коммуникабельность» - «средняя» и «поведение» - «высокое», то «группа 1» - «да», «группа 2» - «нет», «группа 3» - «может быть», «группа 4» - «нет», «группа 5» - «нет», «группа 6» - «нет».

К каждой категории сотрудников установлены определённые требования, на основании которых производится отбор персонала при приеме на работу. Перечень правил отражает данные требования к сотрудникам рассматриваемого торгового предприятия.

Оценка персонала производится по вышеперечисленным показателям ( $x_1$ - $x_6$ ) и её результаты являются основой для нечёткого логического вывода.

В рамках апробации для оценки компетентности персонала был использован программный продукт Fuzzy Logic Toolbox Matlab [14], с помощью которого реализуется нечёткий логический вывод. Пример реализации нечёткого вывода представлен на рис. 2, из которого видно, что при следующих входных переменных:

- возраст кандидата – 25 лет;
- внешний вид – 4 балла;
- образование – 2 (среднее профессиональное);
- опыт работы – 2 года;
- коммуникабельность – 5 баллов;
- поведение – 4 балла

были получены следующие уровни компетентности: 1 категория – 84,8%, 2 категория – 75,4%, 3 категория – 83,3%, 4 категория – 75,1%, 5 категория – 43,2%, 6 категория – 31,4%.



Рис. 2. Реализация программы по оценке компетентности персонала торгового предприятия

По результатам апробации сделано заключение о соответствии рассматриваемых кандидатов вакантным должностям торгового предприятия и принято обоснованное решение об их компетентности.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод, что использование метода нечеткой логики позволяет создать информационную базу для принятия решений в отношении персонала организации, а использование современных средств автоматизации систем управления способствует сокращению времени на анализ данных и обработку результатов. Рассмотренная методология оценки компетентности специалистов может быть адаптирована и для других сфер экономики с учетом специфики предприятия и особенностей системы управления персоналом.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 9001 – 2008. Системы менеджмента качества. Требования [Текст]. – Взамен ГОСТ Р ИСО 9001 – 2001; введ. 2009-11-13. - М.: Стандартинформ, 2009. – 26 с.

2. Ибрагимова, Л. А. Формирование системы непрерывной профессиональной подготовки персонала в области менеджмента качества [Текст]: дис. ... канд. экон. наук: 05.02.22/08.00.05 : защищена 2005 / Ибрагимова Лилия Анваровна - Ижевск, 2005. – 157 с.

3. Вудраф, Ч. Центры развития и оценки. Определение и оценка компетенций [Текст] / Ч. Вудраф; пер. с англ. - М.: ГИППО, 2005. – 384 с.

4. Кибанов, А. Я. Управление персоналом организации [Текст]: практикум. / А. Я. Кибанов - 2-е изд., доп. и перераб. - М: Инфра-М, 2010. – 386с.

5. Иванова, С. В. Искусство подбора персонала. Как оценить человека за час [Текст]: / С. В. Иванова – новое изд. - М.: Альпина Паблишерз, 2011. – 272 с.

6. Купер, Д. Отбор и найм персонала: технологии тестирования и оценки [Текст] / Доминик Купер, Иван Т. Робертсон, Гордон Тинлайн; пер. с англ. - М.: Вершина, 2005 – 336 с.

7. Магура, М. И. Современные персонал - технологии [Текст] / М. И. Магура, М. Б. Курбатова – М.: ИД «Управление персоналом», 2003. – 384 с.

8. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. [Текст] / А. Пегат; пер. с англ. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 798 с.

9. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голубов - М.: Физматлит, 2001. - 221 с.

10. Кузнецов, А. И. Сравнение классических методов анализа и разработки стратегии (матриц) с методами, основанными на нечеткой логике [Электронный ресурс] / А. И. Кузнецов - Электрон. дан. - Режим доступа [http://www.iteam.ru/publications/strategy/section\\_16/article\\_1948/](http://www.iteam.ru/publications/strategy/section_16/article_1948/), свободный. Загл. с экрана.

11. Гриняев, С. Нечеткая логика в системах управления [Электронный ресурс] / С. Гриняев // Журнал «Компьютер-

ра» - Электрон. дан. - Режим доступа <http://offline.computerra.ru/2001/415/13052/>, свободный. Загл. с экрана.

12. Кулик, Р. В. Применение принципов нечеткой логики в методологии BSC [Текст] / Р. В. Кулик // Экономические науки, 2009. - № 7. - С. 322-325.

13. Гуляшинов, А. Н. Теория принятия решений в сложных социотехнических системах [Текст]: учеб. пособие. / А. Н. Гуляшинов, В. А. Тененев, Б. А. Якимович - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2005. - 280 с.

14. Штобва, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab [Текст] / С. Д. Штобва - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 288 с.

## ASSESSMENT OF COMMERCIAL ENTERPRISE PERSONNEL COMPETENCE USING FUZZY LOGIC METHOD

©2012 A. U. Ibragimov, L. A. Ibragimova, M. V. Karavaeva

Izhevsk State Technical University

The paper deals with the application of fuzzy logic method for estimating the competence of personnel. It presents the results of approbation of this method at a commercial enterprise in Izhevsk.

*Fuzzy logic, personnel testing, competence.*

### Информация об авторах

**Ибрагимов Анвар Усманович**, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управления качеством», Ижевский государственный технический университет. E-mail: [UK@istu.ru](mailto:UK@istu.ru). Область научных интересов: разработка и исследование моделей и математических методов анализа экономических процессов и систем в торговле.

**Ибрагимова Лилия Анваровна**, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Управления качеством», Ижевский государственный технический университет. E-mail: [lilia\\_ibr@mail.ru](mailto:lilia_ibr@mail.ru). Область научных интересов: информационно-аналитические системы управления ресурсами торгового предприятия.

**Караваяева Мария Витальевна**, аспирант кафедры «Управление качеством», Ижевский государственный технический университет. E-mail: [avdeeva\\_maria@mail.ru](mailto:avdeeva_maria@mail.ru). Область научных интересов: управление персоналом, системный анализ, нечеткая логика.



**Ibragimov Anvar Usmanovich**, Cand.Tech.Sci., professor, Izhevsk State Technical University. E-mail: [UK@istu.ru](mailto:UK@istu.ru). Area of research: development and research of models and mathematical methods for the analysis of economic processes and systems in trade.

**Ibragimova Liliya Anvarovna**, Cand.Econ.Sci., associate professor, Izhevsk State Technical University. E-mail: [lilia\\_ibr@mail.ru](mailto:lilia_ibr@mail.ru). Area of research: information-analytical systems of trade enterprise resources management.

**Karavaeva Mariya Vitalyevna**, post-graduate student, Izhevsk State Technical University. E-mail: [avdeeva\\_maria@mail.ru](mailto:avdeeva_maria@mail.ru). Area of research: human resource management, system analysis, fuzzy logic.

ББК 74.58

## СИСТЕМА МНОГОУРОВНЕВОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

© 2012 В. И. Столбов

Тольяттинский государственный университет

Рассматривается система многоуровневой непрерывной профессиональной подготовки специалиста по схеме «рабочий-техник-инженер», которая обеспечивала преемственность технического образования в Тольяттинском политехническом институте (ТолПИ).

*Система многоуровневой непрерывной профессиональной подготовки специалиста, формирование умений и навыков, преемственность в образовании.*

При строительстве и пуске Волжского Автозавода в г. Тольятти требовалось в короткие сроки освоить огромное количество новых технологий, оборудования, материалов и много другого, что не применялось в отечественной промышленности. В этих условиях резко обозначились недостатки в подготовке инженерных кадров. У большинства инженеров явно не хватало профессиональных умений и навыков, в результате чего было довольно много ошибок при закупке оборудования, в освоении новых технологий и материалов. На заводе в период его становления безраздельными хозяевами положения были иностранные специалисты, которые не спешили делиться техническими секретами, устанавливая те или иные параметры технологических процессов. Эти и многие другие обстоятельства заставили искать новые подходы к подготовке инженеров для Автозавода. Так в конце шестидесятых и начале семидесятых годов прошлого столетия появились попытки сделать техническое образование многоступенчатым и непрерывным с тем, чтобы умения и навыки сочетались со знаниями в разумных пределах, обеспечивая инженеру уверенность в принимаемых им решениях. Первым официальным документом в этом направлении следует считать договор «О совместной деятельности между коллективами Тольяттинского политехнического института и профтехучилища №44». Тогда впервые появились творческие бригады из учеников ПТУ и студентов ВУЗа, началось обучение рабочих на изготовлении разработок института, родился лозунг –

«обучение рабочей профессии на изготовлении сложной продукции», студенты по вечерам факультативно стали овладевать рабочей профессией на оборудовании и с помощью мастеров ПТУ. Выпускники ВУЗа с большим удовольствием пошли работать в ПТУ в качестве мастеров и преподавателей. В училищах стал заметно меняться психологический климат в сторону сближения с ВУЗом, и в конечном итоге эти позитивные сдвиги привели почти все ПТУ г. Тольятти и даже других городов области к необходимости заключения договоров о сотрудничестве с ТолПИ, создавая образовательные комплексы «ПТУ-ВУЗ».

Вторым знаковым событием следует считать обсуждение опыта ТолПИ на совместной коллегии Минвуза РСФСР и Госпрофобра в 1974 г., когда было принято постановление, обязывающее ВУЗы страны и учебные заведения профтехобразования создавать взаимопользные объединения. Не скрою, это постановление далеко не у всех ректоров страны встретило понимание. Многие посчитали это дополнительной обузой для ВУЗа и как могли противились исполнению этого социально важного дела, чаще всего профанируя идею, подменяя её различными мероприятиями типа «продлённой» практики, когда вся работа преподавателя сводилась к подписанию отчёта студента. Приходится признать, что противникам идеи как внутри ТолПИ, так и вне его удалось почти полностью ликвидировать действие упомянутого постановления, и придуманный ими лозунг «ВУЗ и ПТУ несовместимы» ещё долгое время кочевал

по различным совещаниям, конференциям и собраниям. Ещё на памятной мне коллегии было заметно недоверие многих присутствующих к приводимым в докладе фактам. Они не могли согласиться с тем, что благодаря взаимовыгодному сотрудничеству коллективов ВУЗа и ПТУ в училище снизилась подростковая преступность в три-пять раз, что средний разряд выпускника повысился со второго до третьего, что все студенты вечером за счёт личного времени овладевают рабочей профессией, а ПТУ начало продавать собственную продукцию, разработанную с помощью учёных и студентов ВУЗа. Так или иначе, но первая (начальная) ступень профессионального образования успешно развивалась как в мастерских ПТУ, так и в стенах ВУЗа. В институте стали постепенно изменяться учебные планы и программы в соответствии с теоретическими обобщениями докторской диссертации проректора по учебной работе ТолПИ Ю. А. Кустова «Теоретические основы преемственности профессиональной подготовки молодёжи в профтехучилищах и технических ВУЗах». Из диссертации следовало, что отсутствие у большинства первокурсников навыков профессиональной деятельности в избранной области, ограниченные возможности включения их в производительный труд по специальности, запоздалое использование знаний по общетеоретическим и общетехническим дисциплинам в процессе специального обучения значительно снижало академическую активность студентов. У учащегося и студента на первый план выступала цель получить положительную оценку, что не способствовало развитию творческих способностей молодёжи. Для нас стало очевидным, что естественный путь выработки у молодёжи потребности в знаниях состоит в такой организации обучения, когда оно моделировало бы будущую профессиональную деятельность. Практически это означало, что начинать обучение следует не только с общетеоретических дисциплин, а с их комбинации со специальными курсами. То есть с включения студентов на основе начальной профессиональной подготовки в активные действия, связанные с решением ряда

профессиональных задач, которые требовали бы от них систематического поиска в базовых дисциплинах материала, позволяющего понять специфику специальности.

Выход был найден в организации непрерывной профессиональной подготовки студентов в образовательном комплексе «ПТУ-ВУЗ», начиная с их обучения рабочей профессии с одновременным изучением общетеоретических дисциплин. Экспериментальная разработка непрерывной профессиональной подготовки студентов началась в 1970 г. и была призвана решать следующие задачи:

1. Выявить возможность и целесообразность обучения студентов технических вузов рабочей профессии.

2. Определить материально-техническую базу, содержание, сроки и методику обучения студентов рабочей профессии.

3. Проверить эффективность влияния полученной студентами рабочей профессии на повышение их академической активности.

4. На основе начальной профессиональной подготовки разработать систему включения студентов в трудовую, творческую, научно-исследовательскую деятельность и в производительный труд по специальности.

В начале 1970 г. было организовано факультативное обучение студентов - сварщиков четвёртого курса рабочей профессии с программой обучения в объёме 250 часов. Из них 220 часов отводилось для практического овладения профессией, а 30 часов – на теоретическое обучение по специальности. Студенты изучали сварочное оборудование, технологию сварки, контроль качества сварных соединений, способы исправления дефектов, правила безопасности при выполнении сварочных работ. Практические занятия позволили сформировать у студентов умения и навыки работы со сварочным оборудованием, выполнять сварные швы в различных пространственных положениях.

По завершении производственного обучения Государственная квалификационная комиссия, состоящая из представителей профтехучилища, предприятия и

профилирующей кафедры института, проводила проверку уровня теоретических знаний, практических умений и навыков студентов. По итогам ответов на теоретические вопросы и по качеству выполнения практического задания комиссия выносила решение о присвоении студентам второго или третьего разряда электросварщика ручной дуговой сварки. В итоге все студенты получили удостоверение государственного образца о присвоении им рабочего разряда. Так была доказана возможность и целесообразность обучения студентов рабочей профессии по получаемой в ВУЗе специальности на материально-технической базе ПТУ, которая была много лучше ВУЗовской.

Наряду с положительными моментами в организации обучения студентов старших курсов рабочей профессии были выявлены и недостатки, наиболее значительным из которых стало позднее её получение. Студенты уже не могли использовать и закрепить приобретенные практические навыки в процессе всех видов производственной практики, во время трудовых семестров, при выполнении научно-исследовательских работ. Полученная профессия мало «работала» на закрепление интереса к ранее прочитанным общетеоретическим и общетехническим дисциплинам, к получаемой в ВУЗе специальности. В результате был сделан исключительно важный вывод о том, что обучать студентов рабочей профессии наиболее целесообразно на первом курсе.

Важным этапом в развитии системы многоуровневого профессионального обучения будущих инженеров в комплексе «ПТУ-ВУЗ» было решение Куйбышевского областного управления по профессионально-техническому образованию «Об открытии вечерних отделений профтехучилищ в Тольятти для обучения студентов ВУЗа рабочим профессиям». В 1976 г. состоялся первый набор на вечернее отделение профтехучилища студентов ТолПИ дневного отделения. Было отмечено, что благодаря приобретаемой студентами рабочей профессии заметно растёт их интерес к избранной специальности; по окончании института они смелее идут на производство в качестве мастеров, брига-

диров и операторов сложных установок и уникальных сварочных линий. Опыт показал, что из них вырастают крупные руководители и организаторы, умело ориентирующиеся в сложных производственных ситуациях. Самое же главное состоит в том, что студенты, освоившие рабочую профессию, более осознанно относятся к изучению всех дисциплин учебного плана ВУЗа. Стало выполняться условие, когда специальность становится сферой приложения получаемых знаний, проверкой их правильности, тем каркасом, вокруг которого и формируется система подготовки будущего инженера. Появилась реальная возможность включить студентов в производительный труд по специальности, начиная с младших курсов.

С 1980 года, когда я уже был ректором, Тольяттинский политехнический институт приступил к обучению студентов рабочим профессиям по всем специальностям, имеющимся в ВУЗе.

Студенты первого курса вечернего факультета, не имевшие рабочего разряда, с 1980 г. также направлялись для обучения на дневные отделения ПТУ соответствующего профиля. Для обучения студентов в профессионально-технических училищах по каждой специальности были разработаны соответствующие учебные планы, утверждаемые руководством Куйбышевского областного управления профтехобразования и Тольяттинского политехнического института.

Производственное обучение осуществлялось в учебных мастерских профтехучилищ по расписанию, составленному учебной частью института, и на предприятиях во время, отведённое для первой технологической практики. После практики и сдачи выпускной работы и экзамена Государственной квалификационной комиссии студентам вручались аттестаты (дипломы) установленного образца с присвоением второго или третьего рабочего разряда. Начиная с 1981 г. все студенты ТолПИ ежегодно получали рабочие разряды по специальности.

В процессе эксперимента проводились анкетные опросы студентов всех курсов различных специальностей об их отношении к обучению на первом курсе

рабочей профессии по получаемой в ВУЗе специальности. Опрос показал, что 93% опрошенных студентов высказались за целесообразность и необходимость обучать первокурсников рабочей профессии.

Подобный анкетный опрос с аналогичным результатом был проведён и среди 120 студентов различных курсов вечернего факультета, направляемых в дневные профтехучилища для освоения рабочей профессии по получаемой в ВУЗе специальности.

Такое единодушие студентов вряд ли нуждается в комментариях. Стало очевидно, что найдено исключительно важное звено в педагогической цепочке подготовки технического специалиста. В подтверждение этого вывода был проведён опрос заведующих профилирующими кафедрами с целью выявления положительных сторон и недостатков в организации профессионального обучения студентов в профтехучилищах. По мнению большинства заведующих кафедрами, академическая успеваемость после овладения рабочей профессией повышается в среднем у 80% первокурсников. Студенты, получившие рабочий разряд, более целенаправленно изучают общетеоретические и общетехнические дисциплины, читают дополнительную литературу по специальности, в процессе последующих производственных практик участвуют в работе научно-исследовательских лабораторий. Многие из них заменяют на рабочих местах квалифицированных рабочих, бригадиров, мастеров, прорабов.

Таким образом, в результате обучения студентов первого курса рабочей профессии по получаемой в ВУЗе специальности в комплексе «ПТУ-ВУЗ» было доказано, что специальность в любом профессиональном учебном заведении является ядром, организующим всю разностороннюю подготовку квалифицированных рабочих и специалистов.

Новый социальный заказ на специалиста поставил перед педагогической наукой проблему создания системы непрерывного образования, важной составной частью которой является профессиональная подготовка молодежи в многоуровневых образовательных комплексах типа:

школа – профучилище – техникум - ВУЗ. Такой комплекс был организован в Тольятти в 1990 г. Директоры вошедших в комплекс школ, профтехучилищ и техникумов проявили большую заинтересованность в совершенствовании учебно-воспитательного процесса и на основании результатов исследований защитили кандидатские и докторские диссертации. Особый интерес представляет работа директора Самарского инженерно-педагогического колледжа Осоргина Е. Л. «Преемственность подготовки специалистов в профессионально-педагогическом колледже и ВУЗе», защищённая в Тольяттинском политехническом институте в 1996 г. Автор убедительно доказал возможность выхода средних учебных заведений из тупиковой ситуации, куда в те годы зашло специальное среднее образование страны. Усложнение целей и задач обучения, вытекающих из новых общественных потребностей, вызывало необходимость дальнейшего совершенствования системы профессионального образования на основе усиления взаимодействия, преемственности и интеграции всех его звеньев в образовательные комплексы. Практика показывает, что возможности повышения качества профессиональной подготовки в рамках отдельно взятого звена специального образования вне контекста, вне увязки с развитием системы в целом себя уже исчерпали и такой подход в новых условиях чреват серьёзными негативными последствиями. Например, в условиях, когда в профтехучилищах рабочая профессия даётся не в контексте только первого уровня непрерывного специального образования, а как окончательная цель подготовки к трудовой деятельности, молодёжь не видит перспективы своего дальнейшего профессионального роста и развития, получая своего рода штамп «неполноценности».

Нарушение же в технических вузах закономерности, согласно которой более высокий уровень профессиональной подготовки должен опираться на предыдущий, ведёт к тому, что студенты, не освоив перед получением квалификации инженера деятельность на уровне рабочей профессии и техника, оказываются фак-

тически не готовыми и к деятельности более высокого порядка: использованию и созданию новой техники и технологии, организации и управлению производством, выявлению резервов его интенсификации.

Этот недостаток усугубляется тем, что прогнозирование новых условий производства, характера проектируемой техники и определение набора качеств и видов деятельности рабочих, техников и инженеров, отвечающих требованиям грядущих технологий, не взаимосвязаны. Эти две перспективы преемственно не соединены.

В результате сложившаяся на сегодня система специального образования не обеспечивает непрерывности и поэтапности профессиональной подготовки, не нацелена на перспективу, не несёт в себе элементов будущего в содержании и организации обучения, не связана с разработкой прогностической социально-психологической и педагогической модели специалиста широкого профиля и высокой квалификации на основе современных и зарождающихся технологий. Возросшие требования к профессиональной подготовке рабочих, техников, инженеров, предъявляемые новым этапом научно-технического и социально-экономического развития, вступили в противоречие со старыми организационными формами и педагогическими методами профессионального обучения.

Достаточно сослаться на такой парадокс в системе профессионального образования молодёжи. Для получения высшего образования в системе школа – вуз человеку необходимо затратить 15-16 лет. А для получения квалификации инженера путём последовательного прохождения всех ступеней общего и профессионального образования в системе школа – профтехучилище – техникум – ВУЗ человек должен затратить 20-21 год.

Накопленный опыт реализации многоуровневого профессионального образования в образовательном комплексе «школа – ПТУ – техникум – ВУЗ» позволил определить квалификационные уровни:

первый уровень – специалисты рабочей квалификации, операторы;  
второй уровень – специалисты среднего звена – техник;  
третий уровень – специалисты высшего звена – инженер, патентовед;  
четвёртый уровень – специалисты научной квалификации – кандидат и доктор наук.

Традиционно специалисты рабочей квалификации готовятся в профтехучилищах, специалисты среднего звена – в техникумах (средних специальных учебных заведениях), специалисты высшего звена – в вузах, специалисты научной квалификации – в аспирантуре и докторантуре.

Исходя из того, что человек не только формируется, но и проявляется в деятельности, об основных уровнях его профессиональной подготовки можно судить по специфическим видам деятельности, которые в состоянии выполнять человек и которые могут выступать в качестве эталонных.

Для уровня рабочей квалификации характерна деятельность по заданному алгоритму (техническая карта и др.), определяемому однозначным набором хорошо известных, ранее отработанных сложных операций с использованием ограниченных массивов оперативной и запасённой информации. Однако не следует при этом упрощать ситуацию. Дело в том, что выполнение операций на этом квалификационном уровне требует значительного напряжения как духовных, так и физических сил человека и зачастую очень высокого мастерства, основанного в основном на умениях и навыках при ограниченных знаниях.

Второй квалификационный уровень (техника) характерен деятельностью по заданному сложному алгоритму без конструирования или с частичным конструированием решения, что требует оперирования значительными массивами оперативной и ранее усвоенной информации.

Техник есть специалист, призванный обеспечить существующее производство на необходимом уровне с тем, чтобы количество и качество выпускаемой про-

дукции соответствовали заданию. Техник должен работать на уровне достигнутого, которое сосредоточено в справочниках, ГОСТах и другой регламентирующей документации. Он обязан быстро и квалифицированно решать оперативные вопросы действующего производства, например, когда проводить ремонт оборудования, где создать недостающие заделы, найти необходимых специалистов и тому подобное.

Отличительная особенность деятельности на третьем квалификационном уровне инженера – конструирование (организационного, параметров продукта труда, технологий и др.), а также оперирование большими массивами оперативной и запасённой информации, то есть знаниями. По нашей формулировке – проектирование будущего производства.

Четвёртому уровню научной квалификации присуща информационно-продуктивная деятельность по созданию ранее неизвестных теоретических моделей, требующая от человека способностей, обеспечивающих формулировку проблем в сложных ситуациях, оперирование предельными массивами информации, превышающими уровень ранее познанного в соответствующей области.

Рассмотрев и сравнив примерные качественные характеристики эталонных алгоритмов деятельности специалистов четырёх основных уровней квалификации, ещё раз убеждаемся в объективной необходимости соблюдения закономерности, согласно которой более высокий квалификационный уровень профессиональной подготовки должен опираться на предыдущий. Чтобы стать доктором наук, сначала следует, как правило, стать кандидатом наук. К защите кандидатской диссертации допускаются лица, имеющие высшее образование. Согласно принятой логике и объективно существующей необходимости, высшее и среднее специальное образование следует давать людям, имеющим рабочую квалификацию, которая, если не получена до вуза, должна даваться на младших курсах вуза или техникума. Это одно из обязательных условий преемственности и интеграции профес-

сионального образования молодёжи в образовательных комплексах.

Между получением студентом рабочей квалификации и квалификацией инженера остаётся всё же разрыв преемственности в профессиональной подготовке специалиста. Этот разрыв состоит в обходе студентом получения второго квалификационного уровня – специалиста среднего звена. Следуя логике организации непрерывной профессиональной подготовки специалиста, необходимо было ликвидировать этот пробел. Сделать это оказалось весьма непросто, поскольку в практике технических ВУЗов страны не было случаев присвоения дипломов техника студентам института, и в Минвузе категорически отказывались участвовать в этом. Считаю третьим важным этапом в создании многоуровневой подготовки специалистов в образовательных комплексах приказ Министра высшего образования СССР Г.А. Ягодина по эксклюзивному (только для ТолПИ) разрешению выдавать дипломы техника после третьего курса на основании защиты дипломного проекта с соблюдением всех норм и правил, действующих для средних профессиональных заведений страны. Министр лично приезжал для ознакомления с работами ВУЗа в этой области и был приятно удивлён новой структурой учебного плана ВУЗа, где на первых трёх курсах полностью, но на более высоком теоретическом уровне выполнялись учебные планы техникумов.

Этим приказом с 1990 г. была узаконена в Тольяттинском политехническом институте трёхуровневая подготовка специалистов.

Согласно этой системе на первом курсе студенту предусмотрено дать профессиональную подготовку первого уровня – специальность в объёме рабочей профессии. В течение последующих двух лет к концу третьего курса его следует вывести на второй уровень – специалиста среднего звена с защитой дипломного проекта и вручением диплома техника установленного образца. На протяжении последующих двух лет студент должен выйти на третий уровень специалиста высшего

звена с получением диплома инженера и диплома патентоведа.

С целью исследования эффективности интегративной трёхуровневой подготовки специалистов приказом Госкомитета по высшему образованию РСФСР в 1989 г. на базе Тольяттинского политехнического института был открыт «экспериментальный центр по непрерывной профессиональной подготовке молодежи». Под руководством заведующих профилирующими кафедрами были переработаны учебные планы профессиональной подготовки студентов по ряду специальностей.

Для этих планов характерной была непрерывная специальная подготовка, ступенчато усложняющаяся от одного этапа к другому. Изучение части специальных дисциплин передвинуто на младшие курсы. На первом курсе студенты проходили производственное обучение в объёме, обеспечивающем получение умений и навыков на уровне рабочей квалификации. На втором и третьем курсах изучался цикл специальных дисциплин по технологии, оборудованию, которые традиционно изучались на четвёртом и пятом курсах.

Специальные дисциплины на четвёртом и пятом курсах имели более высокое теоретическое обоснование (теория процессов, спецглавы математики) и были связаны с современными техническими и технологическими тенденциями (автоматизация технологических процессов, использование вычислительной техники в организации и управлении производством, патентоведение, маркетинг и др.).

Другой характерной чертой структуры трёхуровневой подготовки специалистов является концентрическое изучение ряда дисциплин различных циклов.

По гуманитарной подготовке примером этому является изучение иностранного языка. Если на первом курсе его изучение велось с целью овладения общими приёмами разговорной иностранной речи, то на заключительном этапе обучения оно носило явную профессиональную направленность.

То же самое можно сказать относительно поэтапного изучения физики, со-

противления материалов, экономики производства и ряда других дисциплин.

Летом 1991 года состоялся первый выпуск техников по специализациям сварки и пайки. Его результаты показали, что студенты третьего курса вполне справляются с подготовкой и защитой дипломных работ на квалификацию техников.

Государственной квалификационной комиссии помимо записки к дипломному проекту и чертежей представлялся подробный дневник производственной практики с отзывами заводских руководителей практики, руководителей практики от кафедры и отзыв руководителя дипломного проекта. Особенно важным было то, что некоторым выпускникам по результатам учебы в течение трёх курсов, итогам практики и защиты дипломных проектов Государственная квалификационная комиссия настоятельно рекомендовала на этом этапе закончить дальнейшее обучение в ВУЗе и перейти на работу в производство в должности техника. Более успевающим студентам было рекомендовано продолжить дальнейшую учёбу в институте. Считаю, что такой отбор, а не отчисление, законодательно необходим для системы технического высшего образования.

Из анализа итогов первого и последующих выпусков техников явно просматриваются преимущества принятой формы интеграции профессионального образования молодежи в многоуровневых комплексах.

Одно из важнейших преимуществ новой системы перед стандартной структурой подготовки специалистов состоит в приближении целей обучения к студентам. Если раньше конечная цель обучения была удалена от первокурсников на пять лет, то при новой организации цель более приближена во времени. Студент поэтапно и оперативно выходит на конечный результат профессиональной подготовки, каждый раз официально подтверждаемый получением документа о соответствующей квалификации: свидетельства о рабочем разряде, диплома техника, диплома инженера, диплома патентоведа.

Юридическое признание поэтапно приобретаемых студентом знаний и уме-



ний стабилизирует его позитивное отношение к получаемой профессии.

Немаловажное значение имеет и повышение социальной защищённости студента. Получив по окончании первого курса документ о присвоении рабочего разряда, студент в зависимости от конкретной ситуации имеет возможность либо продолжить образование, либо пойти на производство, либо продолжить дальнейшую учёбу без отрыва от производства.

Ещё больше вариантов материально обеспечить себя и семью не в ущерб дальнейшей учёбе у студентов, закончивших третий курс и получивших диплом техника.

Самое же главное заключается в том, что на третьей заключительной ступени качественно меняется характер обучения. Эту ступень могут преодолеть лишь хорошо подготовленные студенты, имеющие твёрдую целевую установку на получение квалификации специалиста высшего звена. Студентов здесь обучают инженерному труду, комплексному, интегративному использованию знаний, технологии творчества, проектированию перспективной техники, технологии и организации производства.

На этом заключительном этапе студент проходит целевую подготовку в соответствии с заказом предприятия на конкретное рабочее место. Его курсовые работы, производственная практика, дипломный проект тесно связаны с решением новых технических и технологических задач производства. Такому специалисту не придётся доучиваться на заводе, как это делается на Волжском автозаводе, где каждый молодой специалист проходит шестимесячное профессиональное обучение. При трёхуровневой интегративной подготовке в образовательном комплексе выпускник вуза с первых дней пребывания на производстве не только включается в активный производительный труд, но, внедряя свои разработки, выполненные в

дипломном проекте, в практику, как правило, входит и в число лидеров научно-технического прогресса на своём предприятии. Рабочая квалификация, умения техника расширяют диапазон его возможностей в решении технических задач, в работе в качестве мастера, руководителя и организатора производства.

Справедливости ради надо сказать, что несмотря на очевидную полезность проводимых в ТолПИ исследований по поиску новых подходов к формированию специалиста в многоуровневом комплексе, эта работа встречала большое сопротивление со стороны работников МинВУ-За в виде различных проверок или игнорирования наших просьб о материальной поддержке. Самым неприемлемым оказалось предложение Министерства трансформировать ступенчатую систему рабочий – техник – инженер в многоуровневую по схеме бакалавр – магистр. В навязываемой новой схеме не только сохраняется, но и усугубляется главный недостаток традиционного профессионального обучения – последовательное изучение естественно - научных, общетехнических и специальных дисциплин, когда знания даются «в запас» в ущерб умениям без увязки со специальностью. Нашим многолетним опытом и многочисленными исследованиями неопровержимо доказана эффективность параллельного обучения, когда специальность является стержнем, вокруг которого формируется будущий специалист любого уровня. В докторской диссертации проректора по учебной работе ТолПИ Н.П. Бахарева «Теория и практика реализации системы многоуровневого профессионально-технического образования», защищённой в 2001 г. в Самарском госуниверситете, исчерпывающе изложена полезность для молодежи и общества предлагаемой системы многоуровневой непрерывной профессиональной подготовки именно инженера традиционной русской формации.

## **THE PROCESS OF CREATING THE SYSTEM OF MULTI-LEVEL CONTINUOUS VOCATIONAL TRAINING OF SPECIALISTS**

© 2012 V. I. Stolbov

Togliatti State University

The paper describes a system of multilevel continuous professional training of specialists on the basis of the “worker-technician-engineer” model which contributes to the continuity of technical education and is successfully implemented at Togliatti Polytechnic Institute.

*The system of multilevel continuous vocational training of specialists, development of practical skills, continuity of education.*

### **Информация об авторах**

**Столбов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства и пайки», Тольяттинский государственный университет. E-mail: [V.I.Stolbov@yandex.ru](mailto:V.I.Stolbov@yandex.ru). Область научных интересов: теплофизика сварочных процессов, педагогика высшего образования.

**Stolbov Vladimir Ivanovich**, Doctor of technical science, professor of the department "Equipment and technology of welding and soldering", Togliatti State University. E-mail: [V.I.Stolbov@yandex.ru](mailto:V.I.Stolbov@yandex.ru). Area of research: thermal physics of welding processes, pedagogy of higher education.

ВЕСТНИК  
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени академика С. П. КОРОЛЁВА  
(национальный исследовательский университет)

№ 1 (32)

2012

Корректоры: **Н. С. Куприянова**  
Компьютерная вёрстка **Е. С. Шахова**  
Переводчик **Е. И. Безрукова**

*Каталожная цена: 1000 руб.*

---

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 32,0.  
Тираж 200. Заказ \_\_\_\_\_

---

Отпечатано в издательстве СГАУ  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала  
«Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета  
имени академика С. П. Королёва  
(национального исследовательского университета)»**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере на одной стороне бумаги в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, 212а – 3А, тел.: (846) 267 48 41, электронная почта: [vest@ssau.ru](mailto:vest@ssau.ru).

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word на дискетах, CD или DVD. Объём статьи – до 10 страниц формата А4. Имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc. Поля – по 2,5 см с каждой стороны, текст – кегль 12, одинарный междустрочный интервал. Выравнивание: по ширине страницы. Шрифты – Times New Roman, Symbol. Отступ первой строки абзаца – 1 см. Страницы должны быть пронумерованы.

Замена буквы «ё» на букву «е» недопустима. Написание в тексте буквы «ё» является обязательным.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG. Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку, подпись располагается снизу, выравнивание – по центру. Для ссылки по тексту статьи на рисунок 1 следует использовать сокращение: рис. 1.

Для математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 и буквы латинского (*Times New Roman, курсив, размер 12*) и греческого (*Symbol, курсив, размер 12*) алфавитов. Формулы, на которые в статье делаются ссылки, следует печатать с новой строки, при этом формулы нумеруются в порядке следования по тексту статьи. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Длина формулы на строке строго ограничена – до 80 мм (допускается перенос на следующие строки).

Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и её номера по порядку, заголовок размещается сверху, выравнивание – по левому краю. Для ссылки по тексту статьи на таблицу 1 следует использовать сокращение: табл. 1.

4. Библиографический список оформляется отдельным разделом в конце статьи, при этом литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка, и оформляется в соответствии с действующим ГОСТ 7.1-2003.

5. К тексту статьи прилагается направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ), рецензия специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы), акт экспертизы, информация об авторах для опубликования в журнале. На отдельной странице указываются сведения об авторах для служебного пользования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефон, электронная почта. Статья должна быть подписана всеми авторами.

6. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Образец оформления:

УДК 536.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ ЗАМКНУТОЙ СТРУКТУРЫ НА БОРТУ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

© 2011 Г. П. Аншаков<sup>1</sup>, В. В. Бирюк<sup>2</sup>, В. В. Васильев<sup>2</sup>, В. В. Никонов<sup>2</sup>, В. В. Салмин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

(аннотация статьи 50...150 слов, кегль: 10)

(ключевые слова 8-12 слов, кегль: 10, начертание: курсив)

(текст статьи)

(библиографический список)

(информация об авторах для опубликования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, электронная почта, область научных интересов – до 10 слов)

THERMAL FIELDS SIMULATING OF COMPLEX CLOSED STRUCTURE ABOARD RESEARCH SPACE  
LABORATORY

© 2011 G. P. Anshakov<sup>1</sup>, V. V. Biruk<sup>2</sup>, V. V. Vasiliev<sup>2</sup>, V. V. Nikonov<sup>2</sup>, V. V. Salmin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

(аннотация статьи – на английском языке)

(ключевые слова – на английском языке)

(библиографический список – на английском языке)

(информация об авторах для опубликования – на английском языке)