

**Редакционный совет**

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

**Редколлегия**

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

**Заместители главного редактора**

**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф.  
**Барсуков Г.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

**Члены редколлегии**

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Бухач А.** д-р техн. наук, проф. (Польша)  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Зубанов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Клименко С.А.** д-р техн. наук, проф. (Украина)  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)  
**Мирсалимов В.М.** д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Старовойтов Э.И.** д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)  
**Хейфец М.Л.** д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

**Ответственный за выпуск**

**Григорьева О.Ю.**

**Адрес редакции**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

**Подписной индекс 29504**

по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2014

## Содержание

### Естественные науки

<i>Желтков В.И., Чадаев Ю.А.</i> Динамические состояния продольно-сжатых неоднородных стержней.....	3
<i>Лавит И.М., Нгуен Ван Чыонг</i> Сверхзвуковой нелинейный флаттер консольно заземленной прямоугольной пластинки.....	8
<i>Абрахимов Р.Р., Сапожников С.Б., Дьяконов А.А.</i> Диспергирование углеродных нанотрубок в вязкой среде. <i>Михеев А.В., Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Журавлева Т.А.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния твердой частицы при внедрении в преграду со сверхзвуковой скоростью.....	14
	18

### Моделирование технологических процессов

<i>Горбунов А.А., Припадчев А.Д.</i> Имитационное моделирование дополнительных аэродинамических поверхностей крыла воздушного судна.....	24
<i>Андрянов С.Б., Долгов В.Б.</i> Моделирование зоны резания при внутреннем шлифовании.....	32
<i>Лобанов И.Е.</i> Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена перманентно закрученного внутри круглой трубы потока.....	36

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Шишко А.А., Прушак А.С., Шагойка А.Г., Павловский А.Ю., Эйсмант Е.И., Овчинников Е.В., Чекан Н.М.</i> Композиционные триботехнические покрытия для металлообрабатывающего инструмента.....	46
<i>Сидорова В.В., Разумов М.С.</i> Устройство для вибрационного сверления.....	51
<i>Никитина Л.Г., Путьрский В.С., Волкова А.С.</i> Влияние импульсного намагничивания на состояние металлорежущего инструмента.....	55
<i>Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И.</i> Собственные частоты колебаний в манипуляционных системах с упругими звеньями.....	59
<i>Гречихин П.В.</i> Применение современных материалов в автомобилестроении.....	66

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Наумов Г.М., Гусев В.Г.</i> Совершенствование подготовки производства высокоточных изделий путем обоснованного выбора оборудования с ЧПУ.....	70
<i>Малютин Г.Е.</i> Определение условий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ.....	74
<i>Сергиев А.П., Макаров А.В., Проскурин А.А.</i> Исследование влияния соотношения первичной и реверсивной деформации на структурные изменения в зоне среза при холодной листовой штамповке.....	82
<i>Баринов С.В., Яшин А.В.</i> Формирование гетерогенной структуры деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой.....	86
<i>Трунов С.Н.</i> Автоматизация обработки изделий на станках с числовым программным управлением на основе параметрического программирования.....	90
<i>Афанасенков М.А.</i> Алгоритмизация комплексной методики формирования функциональных слоев на поверхности режущего инструмента.....	96

### Машины, аппараты, технологии пищевой и легкой промышленности

<i>Корячкин В.П., Алексенко Д.Н., Гончаровский Д.А., Клепов Р.Е.</i> Исследование коэффициента бокового давления фруктово-ягодной начинки для кондитерских изделий.....	101
<i>Тихонов А.А., Асланова С.Н.</i> К вопросу интерполяционного синтеза прямолинейно-оггибающего механизма гладильного пресса.....	108

### Инновации и кадры в машиностроении

<i>Рабинович М.И., Степанова Е.Ю., Уман А.И.</i> Об организационной модели проектирования рейтинговой оценки профессиональной деятельности преподавателей высшей школы.....	114
---	-----

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Кузнецов О.И., Солдаткин В.М.</i> Построение и использование информативных функций опасности в каналах системы предотвращения критических режимов вертолета.....	123
<i>Шкатов П.Н., Малиновский А.К., Мякушев К.В.</i> Измерение глубины трещин электропотенциальным методом с учетом нескольких параметров, влияющих на регистрируемые напряжения.....	133

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Катунин А.Д., Лебедева Л.И.</i> Актуальные проблемы контроля силы коммутации прямоугольных электрических соединителей.....	139
<i>Волченков А.В., Матвеев Е.А.</i> Режим приработки как функция триботехнических свойств материалов.....	144
<i>Шукалов А.В.</i> Повышение точности резервной бесплатформенной системы ориентации на отечественных чувствительных элементах, изготовленных с применением mems-технологий.....	149

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней.



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

**№ 4 (306) 2014**  
July-August

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

## Editorial council

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

## Editorial Committee

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

## Editor-in-chief Assistants

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Barsukov G.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Member of editorial board

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Buchach A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)  
**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Dmitriev A.M.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Zubarev Y.M.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.  
(Russia)  
**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Klimenko S.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)  
**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Kopylov Y.R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph.- Math., Prof. (Russia)  
**Mirsalimov V.M.** Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.  
(Azerbaijan)  
**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Smolenzev V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Starovoitov A.I.** Doc. Sc. Ph- Math., Prof.  
(Belarus)  
**Heifets M.L.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

## Responsible for edition

**Grigorieva O.Yu.**

## Address

302020 Orel,  
Naugorskoe Chossee, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
55-05-81  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

© State University – ESPC, 2014

## Contents

### Natural science

<i>Zheltkov V.I., Chadaev Y.A.</i> The dynamic state of the longitudinally compressed inhomogeneous rods.....	3
<i>Lavit I.M., Nguyen Van Truong</i> Supersonic nonlinear flutter of cantilever restrained rectangular plate...	8
<i>Abdrakhimov R.R., Sapozhnikov S.B., Dyakonov A.A.</i> Dispersion carbon nanotubes in a viscous medium...	14
<i>Mikheev A.V., Stepanov Y.S., Barsukov G.V., Zhuravleva T.A.</i> Modeling of the stress-strain state of solids during introduction into obstacles at supersonic speeds.....	18

### Process modeling

<i>Gorbunov A.A., Pripadchev A.D.</i> Simulation additional airfoil wing aircraft.....	24
<i>Andrianov S.B., Dolgov V.B.</i> Modeling cutting zone at internal grinding.....	32
<i>Lobanov I.E.</i> Mathematical modeling intensify heat permanent swirled inside round pipe flow.....	36

### Construction, calculation, material

<i>Shishko A.A., Prushak A.S., Shagoyka A.G., Pavlovsky A.YU., Eysymont E.I., Ovchinnikov E.V., Chekan N.M.</i> Tribotechnical composite coating for tool machined metal.....	46
<i>Sidorova V.V., Razumov M.S.</i> Device for vibration drilling.....	51
<i>Nikitina L.G., Putyrskiy V.S., Volkova A.S.</i> Influence of pulse magnetization on condition of cutting tools..	55
<i>Krahmalev O.N., Petreshin D.I.</i> Natural oscillation frequencies in handling systems with elastic links.....	59
<i>Grechikhin P.V.</i> Modern materials in the automotive industry.....	66

### Machine building technology and toolware

<i>Naumov G.M., Gusev V.G.</i> Production preparation improvement of high-precision products by the reasonable choicing of numerical control equipment.....	70
<i>Malyutin G.E.</i> Definition of cutting forces in finishing sculpted concave surface complex shape spherical mills on cnc.....	74
<i>Sergiev A.P., Makarov A.V., Proskurin A.A.</i> Study of reverse initial versus strain on structural changes in cold zone shear stamping.....	82
<i>Barinov S.V., Yashin A.V.</i> Formation heterogeneous structure deformation statics hardening pulse processing.....	86
<i>Trunov S.N.</i> Automate the processing of articles on machine tools numerically controlled based on parametric programming.....	90
<i>Afanasenkov M.A.</i> Complex techniques algorithmization formation functional layers on the surface of cutting tool.....	96

### Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Koryachkin V.P., Aleksenko D.N., Goncharovskiy D.A., Klepov R.E.</i> Study of coefficient of lateral pressure of fruit filling for confectionery products.....	101
<i>Tikhonov A.A., Aslanova S.N.</i> On the problem of interpolation synthesis of the rectilinear enveloping mechanism of an ironer.....	108

### Innovation and frame in machine building

<i>Rabinovich M.I., Stepanova E.Y., Uman A.I.</i> On the organizational design model ratings of professional activity of the faculty of the graduate school.....	114
--	-----

### Instrument making and biotechnological system

<i>Kuznetsov O.I., Soldatkin V.M.</i> Constuction and use of the informative functions of danger formation signals of the informational support of channels system prevent critical regimes of the helicopter.....	123
<i>Shkatov P.N., Malinovskiy A.K., Myakushev K.V.</i> Depth measurement cracks electric potential method taking into account several parameters that affect the recorded voltage.....	133

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Volchenkov A.V., Matveev E.A.</i> Running in mode as a function of materials tribological properties.....	139
<i>Katunin A.D., Lebedeva L.I.</i> Actual problem of monitoring a strong of commutation the elements of rectangular electrical connectors.....	144
<i>Shukalov A.V.</i> Accuracy increase of reserve strapdown orientation system based on russian sensors wich design by mems-technolgy.....	149

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

## **ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 539.3:539.384.4

В.И. ЖЕЛТКОВ, Ю.А. ЧАДАЕВ

### **ДИНАМИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДОЛЬНО-СЖАТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

*Рассматривается упругий неоднородный стержень в рамках гипотез Бернулли, нагруженный продольной нагрузкой, не зависящей от времени. В постановке задачи учитываются квадраты углов поворота сечения, что приводит к известным уравнениям устойчивости прямых стержней, учитывающих изменение продольной нагрузки по длине. Рассмотрены граничные условия для следящей и мертвой нагрузки на концах. Приводятся безразмерные уравнения состояния. Получено аналитическое выражение для фундаментального решения задачи о свободных поперечных колебаниях однородного стержня при постоянном градиенте продольной нагрузки и сформулирован метод последовательных приближений для стержня переменного поперечного сечения.*

**Ключевые слова:** сжато-изогнутый стержень, гипотезы Бернулли, метод начальных параметров, аналитические решения, последовательные приближения.

В современной технике и строительстве часто встречаются элементы конструкций, физическими моделями которых являются прямые стержни. В ряде случаев конструкторские соображения, зачастую требования оптимальной материалоемкости и т.п., приводят к необходимости использования переменного по длине переменного сечения. Закон изменения сечения по длине может быть гладким (например, стержни равного сопротивления) или ступенчатым (например, система однородных стержней с общей осью, контур которой состоит из прямых участков и вписан в фигуру равного сопротивления). Если такой стержень нагружен продольной и поперечной нагрузками, то одной из важных является ситуация, когда продольная нагрузка – сжимающая. При этом уменьшается несущая способность стержня, уменьшаются собственные частоты поперечных колебаний, что может привести к разрушению. Поэтому определение статических и динамических напряженно-деформированных состояний стержней переменного сечения при действии сжимающей продольной нагрузки является одним из неперемных условий проектирования стержней и стержневых систем.

Примем, что для стержня справедливы гипотезы Бернулли  $[0, 0, 0]$ :

- поперечное сечение, плоское и ортогональное оси стержня в начальном состоянии, остается плоским и ортогональным к деформированной оси стержня и не изменяет поперечных размеров и формы (*гипотеза плоских сечений*);

- слои, параллельные оси стержня, не надавливают друг на друга, (иначе – на площадках с нормальными, ортогональными оси стержня, отсутствуют нормальные напряжения) (*гипотеза ненадавливания слоев*).

Материал стержня считаем линейно-упругим.

В рамках принятых гипотез дифференциальное уравнение свободных поперечных колебаний однородного стержня с учетом влияния растяжения/сжатия на состояние изгиба принимают вид  $[0, 0, 0]$ :

$$[EJ(\xi)v'''] + \rho A \ddot{v} - [N(x,t)\theta'] = 0; \quad (1)$$

однородные условия на торцах стержня:

$$\begin{aligned} EJ(L)v''(L)\delta\theta(L) = 0; \quad EJ(0)v''(0)\delta\theta(0) = 0 \\ \left[ -[EJ(L)v''(L)] + N(L)\theta(L) \right] \delta v(L) = 0 \\ \left[ [EJ(0)v''(0)] - N(0)\theta(0) \right] \delta v(0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и начальные условия:

$$v(x,0) = v_0(x); \dot{v}(x,0) = V_0(x). \quad (3)$$

Здесь  $E, \rho$  – модуль Юнга и плотность материала,  $A(x), J(x)$  – площадь и наименьший главный центральный момент инерции поперечного сечения,  $v(x,t)$  – поперечное перемещение,  $\theta(x, t) = v'(x,t)$  – угол поворота сечения относительно главной центральной оси инерции сечения,  $N(x,t)$  – продольная сила, которую считаем известной функцией продольной координаты  $x$  и времени  $t$ ,  $q_y(x,t)$  – известная распределенная нагрузка,  $\delta$  обозначает кинематически допустимую вариацию.

Предположим, что продольная сила не зависит от времени и линейно зависит от продольной координаты  $x$ :

$$N(x) = N_0 + q_x x, \quad (4)$$

что справедливо для нагружения собственным весом или аналогичной ему нагрузкой.

Перейдем к безразмерным переменным:

$$A(\xi) = A_0 [1 + \alpha(\xi)], \quad J(\xi) = J_0 [1 + j(\xi)];$$

$$\xi = \frac{x}{L}; \varpi = \frac{v}{L}; \mu = \frac{ML}{EJ_0}; \Theta = \frac{QL^2}{EJ_0}; \nu = \frac{NL^2}{EJ_0}, \quad \gamma_x = \frac{q_x L}{EJ_0}, \quad (5)$$

и заменим (1) эквивалентной системой уравнений первого порядка, предполагая, что свободные поперечные колебания реализуются по гармоническому закону  $v(x,t) = v(x) \exp(i\omega t)$ :

$$\psi'(\xi) = A(\xi)\psi(\xi) + \Omega^2 M(\xi)\psi(\xi); \quad \psi = \{\varpi \quad \theta \quad \mu \quad \Theta\};$$

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1+j(\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \gamma_x & \frac{\nu_0^2 + \gamma_x \xi}{1+j(\xi)} & 0 \end{bmatrix}; \quad M(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 + \alpha(\xi) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\Omega^2 = \frac{\rho AL^4}{EJ} \omega^2 \quad (6)$$

Выделим в последнем выражении переменную матрицу и запишем его в виде:

$$\frac{d\psi^0}{d\xi} = [A^0 + S(\xi)]\psi^0,$$

$$A^0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Omega^2 & \gamma_x & \nu_0^2 & 0 \end{bmatrix}; \quad S(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{j(\xi)}{1+j(\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega^2 \alpha(\xi) & 0 & \frac{\xi \gamma_x - \nu_0^2 j(\xi)}{1+j(\xi)} & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Для решения (7) используем метод последовательных приближений в варианте [0], когда за начальное приближение принимается решение задачи при постоянной матрице  $A = A^0$ :

$$\frac{d\psi^0}{d\xi} = A^0 \psi^0 \rightarrow \psi^0(\xi) = V^0(\xi) \psi^0(0) = V^0(\xi) \psi_0. \quad (8)$$

Здесь  $V^0(\xi)$  – нормированная матрица фундаментальных решений,  $V^0(0) = I_4$  – единичная матрица  $4 \times 4$ ,  $\psi_0$  – вектор состояния в начале стержня, или вектор начальных параметров. Следующие приближения определяются по рекуррентным формулам [0]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi^m}{d\xi} &= A^0 \psi^m + S(\xi) \psi^{m-1}(\xi) \rightarrow \\ \rightarrow \psi^m(\xi) &= V^0(\xi) \psi_0 + \int_0^\xi V^0(\xi - \xi_1) S(\xi_1) \psi^{m-1}(\xi_1) d\xi_1 \end{aligned} \quad (9)$$

Исходя из (8), последнему слагаемому нетрудно придать вид:

$$\begin{aligned} \int_0^\xi V^0(\xi - \xi_1) S(\xi_1) \psi^{m-1}(\xi_1) d\xi_1 &= [\Delta V_1(\xi) + \Delta V_2(\xi) + \dots + \Delta V_{m-1}(\xi)] \psi_0; \\ \Delta V^1(\xi) &= \int_0^\xi V^0(\xi - \xi_1) S(\xi_1) V^0(\xi_1) d\xi_1, \dots, \Delta V^n(\xi) = \int_0^\xi V^0(\xi - \xi_1) S(\xi_1) \Delta V^{n-1}(\xi_1) d\xi_1 \end{aligned} \quad (10)$$

Нетрудно заметить, что матричный ряд (10) является частным случаем ряда Пеано (матрицанта) [0], в чем легко убедиться, положив  $V^0(\xi)$  равнымединичной матрице. При интегрируемой матрице  $V^0(\xi)$  и ограниченной матрице неоднородности  $S(\xi)$  ряд (10) также сходится по норме. Следовательно, для стержня переменного сечения, нагруженного переменной по длине продольной нагрузкой, решение задачи о поперечных свободных колебаниях стержня может быть представлено в виде, характерном для метода начальных параметров:

$$\psi(\xi) = V^m(\xi, \Omega, \gamma_x, \nu_0) \psi_0. \quad (11)$$

Здесь верхний индекс  $m$  матрицы фундаментальных решений показывает, что она вычисляется в виде суммы ряда (10); для стержня постоянного сечения  $m=0$ , то есть используется решение (8).

Отметим, что решение (11) безразмерное. Для возврата к размерным компонентам состояния следует домножать его слева на диагональную матрицу, выражающую соотношения между размерными и безразмерными переменными (5):

$$y(\xi) = D\psi; \quad D = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EJ_0}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EJ_0}{L^2} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Здесь  $y$  – размерный вектор состояния,  $L, E, J_0$  – длина, модуль Юнга, момент инерции стержня.

Для кусочно-однородного стержня используется алгоритм метода начальных параметров [0]. Так как часть начальных параметров определена из условий закрепления в начале стержня, то для определения остальных следует использовать условия в конце стержня.

Для этого определим матрицу влияния начальных параметров на состояние в произвольной точке стержня:

$$\begin{aligned} \psi(\xi_n) &= V_n^{m_n}(\xi_n, \Omega_n, \gamma_{x_n}, \nu_{0n}) \prod_{k=1}^{n-1} D_{k+1}^{-1} D_k V_k^{m_k}(1, \Omega_k, \gamma_{x_k}, \nu_{0k}) \psi_0, \\ n: \xi_n L_n &\in [x_{n-1}, x_n] \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь введена глобальная система координат  $x$ , начало которой помещено в начало неоднородного стержня,  $x_{n-1}, x_n$  – начало и конец однородного участка, его длина  $L_n = x_n - x_{n-1}$ , локальная безразмерная координата  $\xi_n = (x - x_{n-1}) / L_n$ , безразмерные параметры  $\Omega, \gamma_x, \nu_0$  вычисляются для конкретного участка по его характеристикам. Отметим, что безразмерная частота каждого участка-стержня пропорциональна размерной частоте  $\omega$  (см. (6)), и в (13) можно

вместо  $\Omega$  можно использовать  $\omega$ ; то же относится и к продольной силе и ее градиенту ( см. (5)). Тогда (13) удобно переписать в виде:

$$\psi(\xi_n) = V_n^{m_n}(\xi_n, \omega, q_x, N_0) \prod_{k=1}^{n-1} D_{k+1}^{-1} D_k V_k^{m_k}(1, \omega, q_x, N_0) \psi_0, \\ n: \xi_n L_n \in [x_{n-1}, x_n] \quad (14)$$

Так как в (14) верхние индексы  $m_k$  независимы друг от друга, то неоднородный стержень может содержать участки как с постоянной, так и с переменной площадью сечения из различных материалов.

Условия закрепления на конце стержня можно получить, записывая (14) для конца стержня. Уточним терминологию; назовем *неразветвленной стержневой системой* (НРСС) последовательность стержней, соединенных так, что конец одного стержня соединяется с началом другого, образуя *узел системы* и никакой третий стержень в этом узле не присутствует. Каждый стержень отличается тем, что в его пределах изменение площади сечения определяется непрерывной и гладкой функцией локальной координаты  $\xi$ ; аналогичное утверждение относится и к свойствам материала. Сосредоточенные нагрузки (силы и моменты) могут быть приложены только в узлах системы. В рамках рассматриваемой задачи все стержни системы имеют общую ось. Математической моделью каждого составляющего стержня системы является нормированная матрица фундаментальных решений (11). Для связи НРСС с окружающей средой введем ее математическую модель, определенную формулой (13), записанную в виде матриц влияния начального узла системы, которому припишем номер 0, на любой другой узел с номерами  $1 \dots M$ . Так, матрица влияния начального узла 0 на конечный  $M$ , из (14) имеет вид:

$$R_{M0} = V_M^{m_M}(1, \omega, q_x, N_0) \prod_{k=1}^{M-1} D_{k+1}^{-1} D_k V_k^{m_k}(1, \omega, q_x, N_0); \\ \psi(x_M) = R_{M0}(\omega, q_x, N_0) \psi_0 \quad (15)$$

Здесь  $x_M$  – глобальная координата конца стержня.

Так как  $\psi(x_M)$  имеет четыре строки, а неизвестных начальных параметров два, то из (15) выбираются две строки, отвечающие заданным однородным граничным условиям в точке  $x_M$ . Известные начальные параметры, в силу однородности, равны нулю. В силу однородности граничных условий и линейности модели относительно начальных параметров разрешающая система граничных условий – линейная однородная второго порядка, и условие существования нетривиального решения – равенство нулю главного определителя системы. Это условие удобно использовать для определения связи между частотой свободных колебаний  $\omega$  и параметрами сжимающей нагрузки  $q_x$  и  $N_0$ .

После определения нужного количества собственных частот следует использовать (14) для построения форм свободных колебаний, которые можно применить для разложения поперечных внешних нагрузок и решения неоднородных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. - М.: Дрофа, 2004. – 592 с.
2. Болотин, В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости / В.В. Болотин. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1961. – 340 с.
3. Васина М.В. Численно-аналитический метод определения форм свободных колебаний пространственно-криволинейных неоднородных стержней / Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук – Тула, 2011 – 129 с.
4. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1957. – 984 с.
5. Грязев, М.В. Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела. Часть 1. Статика стержней / М.В. Грязев, В.И. Желтков, А.А. Васин М.В., Васина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 112 с.
6. Демидович, Б.П. Лекции по математической теории устойчивости / Б.П. Демидович. – М.: Наука, 1967. – 472 с.

**Желтков Владимир Иванович**

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор каф. «Математическое моделирование»

**Чадаев Юрий Андреевич**

Тульский государственный университет, г. Тула

Аспирант каф. «Математическое моделирование»

V.I. ZHELTKOV, Y.A. CHADAEV

## THE DYNAMIC STATE OF THE LONGITUDINALLY COMPRESSED INHOMOGENEOUS RODS

*Considered inhomogeneous elastic rod under the hypotheses Bernoulli, naryzeniny longitudinal load, not time-dependent. The formulation takes into account the squares of the angles of rotation of the cross section, which leads to well-known equations stability of straight bars, taking into account the change of the longitudinal load length. Considered boundary conditions for the witness and dead load on the ends. Are the dimensionless equation of state. An analytic expression for the fundamental solution of the problem of free transverse vibrations of a uniform tertiary constant gradient of the longitudinal load and the method of successive approximations for a rod of variable cross section.*

**Keywords:** *oblate-bent rod, hypotheses of Bernoulli, method of initial parameters, analytical solutions, iterations.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Babakov, I.M. Teorija kolebanij / I.M. Babakov. - M.: Drofa, 2004. – 592 s.
2. Bolotin, V.V. Nekonservativnye zadachi teorii uprugoj ustojchivosti / V.V. Bolotin. – M.: Gos. izd. fiz.-mat. lit., 1961. – 340 s.
3. Vasina M.V. Chislenno-analiticheskij metod opredelenija form svobodnyh kolebanij prostranstvenno-krivolinejnyh neodnorodnyh sterzhnej / Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz.-mat. nauk – Tula, 2011 – 129 s.
4. Vol'mir, A.S. Ustojchivost' deformiruemyh sistem / A.S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1957. – 984 s.
5. Grjazev, M.V. Prikladnye zadachi mehaniki deformiruемого твердого тела. Chast' 1. Statika sterzhnej / M.V. Grjazev, V.I. Zheltkov, A.A. Vasin M.V., Vasina. – Tula: Izd-vo TulGU, 2011. – 112 s.
6. Demidovich, B.P. Lekcii po matematicheskoj teorii ustojchivosti / B.P. Demidovich. – M.: Nauka, 1967. – 472 s.

**Zheltkov Vladimir Ivanovich**

Tula State University, Tula

D.Ph, professor of dept. 'Mathematical modelling'

**Chadaev Yury Andreevich**

Tula State University, Tula

Post-graduate student of dept. 'Mathematical modelling'

## СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ ФЛАТТЕР КОНСОЛЬНО ЗАЩЕМЛЕННОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ

*Рассматриваются автоколебания прямоугольной пластинки в сверхзвуковом потоке газа. Пластика закреплена вдоль одной из сторон, параллельных потоку. Деформирование пластинки описывается теорией Кармана, ее взаимодействие с потоком – поршневой теорией. Интегрирование по времени осуществляется по конечноразностной схеме Кранка-Николсон, по пространственной области – методом конечных элементов. Используются согласованные конечные элементы Бюргера-Фокса-Шмита. Нелинейность задачи учитывается методом последовательных приближений. Результаты расчетов показывают, что при малых удлинениях пластинки наряду с обычной формой автоколебаний – предельным циклом, возникают нерегулярные, но не хаотические колебания.*

**Ключевые слова:** аэроупругость, пластинка Кармана, автоколебания, нелинейный сверхзвуковой флаттер.

В первом исследовании нелинейного сверхзвукового флаттера консольно закреплённых пластинок [1] описание деформирования пластинки было основано на теории Кармана, а моделирование взаимодействия пластинки с газовым потоком – на теории полосы [2]. С использованием метода Галеркина задача была сведена к системе обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, которая интегрировалась методом Рунге-Кутты. Неясно, удовлетворяет ли система координатных функций работы [1] условию полноты; этот вопрос в работе [1] не рассматривался. Кроме того, в силу нелинейности задачи при большом числе неизвестных может возникнуть проблема устойчивости решения. Поэтому есть основания для разработки альтернативного подхода, не вызывающего упомянутые сомнения. Такой подход изложен ниже. Его суть в том, что вначале выполняется переход к неявной конечноразностной схеме интегрирования по времени, а затем преобразованная таким образом система уравнений решается методом конечных элементов.

Рассмотрим отнесенную к декартовым координатам  $x_k$ ,  $k = 1, 2, 3$  прямоугольную пластинку, обтекаемую потоком газа (рисунок 1), скорость которого на бесконечности равна  $V$ . Плоскость  $z \equiv x_3 = 0$  является нейтральной плоскостью пластинки. Внешние нагрузки в плоскости пластинки отсутствуют. Поперечной нагрузкой является давление газа. Сторона пластинки  $AB$  закреплена, остальные стороны свободны. Перемещения точки пластинки обозначаются  $u_k$ ,  $k = 1, 2, 3$ . Из компонент тензора деформаций ненулевыми являются  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ . Их связь с перемещениями определяется формулами

$$\varepsilon_{11} = \partial_1 u_1 + \frac{1}{2}(\partial_1 w)^2, \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2}(\partial_1 u_2 + \partial_2 u_1 + \partial_1 w \partial_2 w), \quad \varepsilon_{22} = \partial_2 u_2 + \frac{1}{2}(\partial_2 w)^2, \quad \partial_k \equiv \frac{\partial}{\partial x_k} \quad (1)$$

где  $w(x_1, x_2) \equiv u_3$  – прогиб пластинки. Учет нелинейных членов в выражениях (1) при сохранении гипотез Кирхгофа определяет теорию Кармана. Перемещения  $u_1, u_2$  выражаются в виде

$$u_1 = u_{10} - z \partial_1 w, \quad u_2 = u_{20} - z \partial_2 w \quad (2)$$

где  $u_{10}(x_1, x_2)$ ,  $u_{20}(x_1, x_2)$  – перемещения точек нейтральной плоскости. Подстановка формул (2) в выражения (1) дает

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \partial_1 u_{10} - z \partial_1 \partial_1 w + \frac{1}{2}(\partial_1 w)^2, & \varepsilon_{12} &= \frac{1}{2}(\partial_1 u_{20} + \partial_2 u_{10} - 2z \partial_1 \partial_2 w + \partial_1 w \partial_2 w), \\ \varepsilon_{22} &= \partial_2 u_{20} - z \partial_2 \partial_2 w + \frac{1}{2}(\partial_2 w)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Из компонент тензора напряжений отличны от нуля  $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ . Они определяются выражениями

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{11} + \nu \varepsilon_{22}), \quad \sigma_{12} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{12}, \quad \sigma_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{22} + \nu \varepsilon_{11}) \quad (4)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

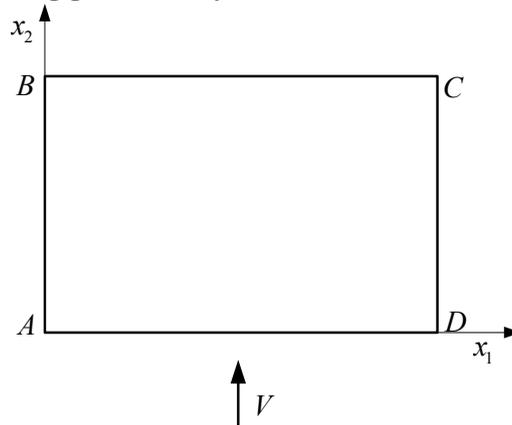


Рисунок 1 – Схема обтекания пластинки

Численное решение задачи строится на основе принципа возможных перемещений

$$\int_{\Omega} (\rho_0 \partial_t \partial_t u_k \delta u_k + \sigma_{mn} \delta \varepsilon_{mn}) d\Omega = \int_S p_k \delta u_k dS \quad (5)$$

где  $\Omega$  – объем пластинки,  $S$  – площадь ее поверхности,  $\rho_0$  – плотность материала пластинки,  $t$  – время,  $p_k$  – внешняя нагрузка. В данном случае

$$p_1 = 0; \quad p_2 = 0; \quad p_3 = q$$

Силами инерции в плоскости пластинки пренебрегаем. Следовательно

$$\partial_t \partial_t u_k \delta u_k = \partial_t \partial_t w \delta w$$

Выражение (5) преобразуется к виду

$$\int_{\Omega} (\rho_0 \partial_t \partial_t w \delta w + \sigma_{mn} \delta \varepsilon_{mn}) d\Omega = \int_S q \delta w dS \quad (6)$$

Аэродинамическая нагрузка определяется, согласно поршневой теории [2], формулой

$$q = -2\rho c (\partial_t w + V \partial_2 w) \quad (7)$$

где  $\rho, c$  – плотность газа и скорость звука на бесконечности. Подстановка соотношений (1-5, 7) в уравнение (6) и интегрирование по толщине пластинки  $h$  преобразуют (6) к виду

$$\begin{aligned} \int_S \left\{ \mu \partial_t \partial_t w \delta w + e_1 \left[ \left( \partial_1 u_{10} + \frac{1}{2} (\partial_1 w)^2 \right) + \nu \left( \partial_2 u_{20} + \frac{1}{2} (\partial_2 w)^2 \right) \right] [\partial_1 \delta u_{10} + \partial_1 w \partial_1 \delta w] + \right. \\ + e_1 \left[ \left( \partial_2 u_{20} + \frac{1}{2} (\partial_2 w)^2 \right) + \nu \left( \partial_1 u_{10} + \frac{1}{2} (\partial_1 w)^2 \right) \right] [\partial_2 \delta u_{20} + \partial_2 w \partial_2 \delta w] + \\ + e_2 (\partial_1 u_{20} + \partial_2 u_{10} + \partial_1 w \partial_2 w) (\partial_1 \delta u_{20} + \partial_2 \delta u_{10} + \partial_2 w \partial_1 \delta w + \partial_1 w \partial_2 \delta w) + \\ + (\partial_1 \partial_1 w + \nu \partial_2 \partial_2 w) \partial_1 \partial_1 \delta w + (\partial_2 \partial_2 w + \nu \partial_1 \partial_1 w) \partial_2 \partial_2 \delta w + \\ \left. + 2(1-\nu) \partial_1 \partial_2 w \partial_1 \partial_2 \delta w + 2\eta (\partial_t w + M \partial_2 w) \right] \delta w \Big\} dS = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

Здесь и ниже все величины, имеющие размерность длины, отнесены к толщине пластинки, время – к величине  $h/c$ . Введены обозначения:  $M = V/c$  – число Маха на бесконечности,

$$\mu = \frac{12(1-\nu^2)\rho_0 c^2}{E}, \quad \eta = \frac{12(1-\nu^2)\rho c^2}{E}, \quad e_1 = 12, \quad e_2 = 6(1-\nu)$$

Для интегрирования по времени используется неявная конечноразностная схема Кранка-Николсон [3]. Пусть  $\Delta t$  – величина шага интегрирования по времени,  $n = 1, 2, \dots$  – номер шага. Конечноразностное представление производной по времени на  $n$ -ом шаге имеет вид  $\partial_t y \approx (y^n - y^{n-1})/\Delta t$ , где  $y^n, y^{n-1}$  – значения  $y$  на границах временного интеграла, причем  $y^n$  известны из решения для предыдущего шага. Величины, не содержащие производных по времени, представляются на  $n$ -ом шаге интегрирования по времени в виде  $y \approx 0.5(y^n + y^{n-1})$ .

Влияние нелинейностей в уравнении (8) учитывается методом последовательных приближений. На каждом шаге итерационного процесса нелинейные члены известны и рассматриваются как массовые силы. При этом уравнение (8) распадается на два, так как в линейном приближении плоское деформирование и изгиб пластинки независимы. Перенеся нелинейные слагаемые в правые части, получим уравнение для прогиба в виде

$$\int_S \left[ \frac{4}{\Delta t} \left( \frac{\mu}{\Delta t} + \eta \right) w^n \delta w + (\partial_1 \partial_1 w^n + \nu \partial_2 \partial_2 w^n) \partial_1 \partial_1 \delta w + (\partial_2 \partial_2 w^n + \nu \partial_1 \partial_1 w^n) \partial_2 \partial_2 \delta w + \right. \\ \left. + 2(1 - \nu) \partial_1 \partial_2 w^n \partial_1 \partial_2 \delta w + 2\eta M \partial_2 w^n \delta w \right] dS = \int_S \left[ \frac{4}{\Delta t} \left( \left( \frac{\mu}{\Delta t} + \eta \right) w^{n-1} + \mu v^{n-1} \right) \delta w - \right. \\ \left. - (\partial_1 \partial_1 w^{n-1} + \nu \partial_2 \partial_2 w^{n-1}) \partial_1 \partial_1 \delta w - (\partial_2 \partial_2 w^{n-1} + \nu \partial_1 \partial_1 w^{n-1}) \partial_2 \partial_2 \delta w - 2(1 - \nu) \partial_1 \partial_2 w^{n-1} \partial_1 \partial_2 \delta w - \right. \\ \left. - 2\eta M \partial_2 w^{n-1} \delta w \right] dS - \int_S \left\{ e_1 \left[ \left( \partial_1 u_{10}^n + \frac{1}{2} (\partial_1 w^n)^2 \right) + \nu \left( \partial_2 u_{20}^n + \frac{1}{2} (\partial_2 w^n)^2 \right) \right] \partial_1 w^n \partial_1 \delta w + \right. \\ \left. + e_1 \left[ \left( \partial_2 u_{20}^n + \frac{1}{2} (\partial_2 w^n)^2 \right) + \nu \left( \partial_1 u_{10}^n + \frac{1}{2} (\partial_1 w^n)^2 \right) \right] \partial_2 w^n \partial_2 \delta w + e_2 \left( \partial_1 u_{20}^n + \partial_2 u_{10}^n + \partial_1 w^n \partial_2 w^n \right) \times \right. \\ \left. \times (\partial_2 w^n \partial_1 \delta w + \partial_1 w^n \partial_2 \delta w) \right\} dS - \int_S \left\{ e_1 \left[ \left( \partial_1 u_{10}^{n-1} + \frac{1}{2} (\partial_1 w^{n-1})^2 \right) + \nu \left( \partial_2 u_{20}^{n-1} + \frac{1}{2} (\partial_2 w^{n-1})^2 \right) \right] \partial_1 w^{n-1} \partial_1 \delta w + \right. \\ \left. + e_1 \left[ \left( \partial_2 u_{20}^{n-1} + \frac{1}{2} (\partial_2 w^{n-1})^2 \right) + \nu \left( \partial_1 u_{10}^{n-1} + \frac{1}{2} (\partial_1 w^{n-1})^2 \right) \right] \partial_2 w^{n-1} \partial_2 \delta w + \right. \\ \left. + e_2 \left( \partial_1 u_{20}^{n-1} + \partial_2 u_{10}^{n-1} + \partial_1 w^{n-1} \partial_2 w^{n-1} \right) (\partial_2 w^{n-1} \partial_1 \delta w + \partial_1 w^{n-1} \partial_2 \delta w) \right\} dS$$

а уравнение для перемещений в нейтральной плоскости – в виде

$$\int_S \left[ e_1 (\partial_1 u_{10}^n + \nu \partial_2 u_{20}^n) \partial_1 \delta u_{10} + e_1 (\partial_2 u_{20}^n + \nu \partial_1 u_{10}^n) \partial_2 \delta u_{20} + e_2 (\partial_1 u_{20}^n + \partial_2 u_{10}^n) (\partial_1 \delta u_{20} + \partial_2 \delta u_{10}) \right] dS = \\ = - \int_S \left[ e_1 (\partial_1 u_{10}^{n-1} + \nu \partial_2 u_{20}^{n-1}) \partial_1 \delta u_{10} + e_1 (\partial_2 u_{20}^{n-1} + \nu \partial_1 u_{10}^{n-1}) \partial_2 \delta u_{20} + \right. \\ \left. + e_2 (\partial_1 u_{20}^{n-1} + \partial_2 u_{10}^{n-1}) (\partial_1 \delta u_{20} + \partial_2 \delta u_{10}) \right] dS - \int_S \left[ \frac{e_1}{2} \left( (\partial_1 w^n)^2 + \nu (\partial_2 w^n)^2 \right) \partial_1 \delta u_{10} + \right. \\ \left. + \frac{e_1}{2} \left( (\partial_2 w^n)^2 + \nu (\partial_1 w^n)^2 \right) \partial_2 \delta u_{20} + e_2 \partial_1 w^n \partial_2 w^n (\partial_1 \delta u_{20} + \partial_2 \delta u_{10}) \right] dS - \\ - \int_S \left[ \frac{e_1}{2} \left( (\partial_1 w^{n-1})^2 + \nu (\partial_2 w^{n-1})^2 \right) \partial_1 \delta u_{10} + \frac{e_1}{2} \left( (\partial_2 w^{n-1})^2 + \nu (\partial_1 w^{n-1})^2 \right) \partial_2 \delta u_{20} + \right. \\ \left. + e_2 \partial_1 w^{n-1} \partial_2 w^{n-1} (\partial_1 \delta u_{20} + \partial_2 \delta u_{10}) \right] dS$$

где обозначено:  $v = \partial_t w$ . Оба уравнения при известных правых частях представляют собой уравнения линейных задач: первое – для изгиба пластинки, второе – для плоской задачи. Оба решаются методом конечных элементов. Использованный вариант метода решения первого уравнения описан в работе [4], второго – в работе [5].

Среди возможных примеров решения задачи наибольший интерес представляют пластинки малого удлинения. Для них характерна потеря устойчивости – переход от затухающих колебаний к флаттеру – не в результате слияния двух первых собственных частот колебаний, а вследствие слияния более высоких частот.

Пусть  $a$  – длина стороны  $AD$ , а  $b$  – длина стороны  $AB$ . Рассмотрим задачу о флаттере пластинки при следующих исходных данных:  $v = 0.3$ ,  $b/a = 3.6$ ,  $h/a = 1.5 \cdot 10^{-2}$ ,  $\mu = 3.14 \cdot 10^{-2}$ ,  $\eta = 1.5 \cdot 10^{-5}$ . Число конечных элементов по оси абсцисс принималось равным 10, по оси ординат – 36, шаг по времени –  $\Delta t = 0.05$ . Анализ точности решения показывает, что при этих параметрах относительная погрешность расчетов не превышает  $10^{-3}$ .

Вычисление критического значения числа Маха, при достижении которого теряется устойчивость, с использованием линейной постановки задачи [4] дает  $M_c = 2.99$ . Более подробный анализ показывает, что вместо двух обычных интервалов изменения  $M$ :  $M < M_c$ , в котором колебания затухают, и  $M > M_c$ , в котором имеет место флаттер, в данном случае можно выделить пять интервалов изменения  $M$  (таблица 1).

Таблица 1 – Интервалы изменения числа Маха

Номер интервала	1	2	3	4	5
$M$	$< 2.99$	$(2.99, 3.78)$	$(3.78, 4.31)$	$(4.31, 5.60)$	$> 5.60$
Характер колебаний	затухающие	флаттер	затухающие	флаттер	флаттер

В первом интервале все собственные значения действительны, следовательно, колебания затухают – пластинка устойчива. Во втором интервале за счет слияния второго и третьего собственных чисел образуется пара комплексных собственных чисел и возникает флаттер – пластинка теряет устойчивость. В третьем интервале опять все собственные значения устойчивы, и, следовательно, колебания должны затухать. В четвертом интервале возникает флаттер за счет слияния третьего и четвертого собственных значений и образования комплексной пары. И, наконец, в пятом интервале к ним добавляется пара комплексных собственных значений, образованная за счет слияния первого и второго собственных чисел.

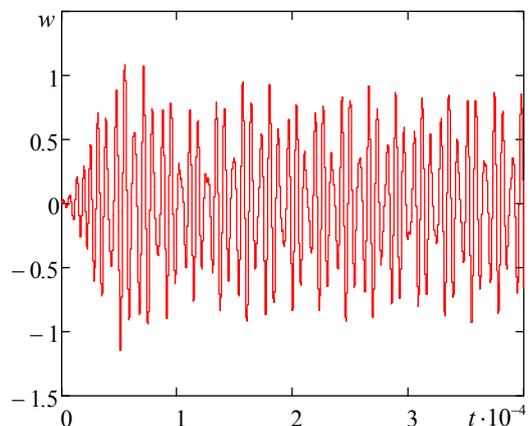
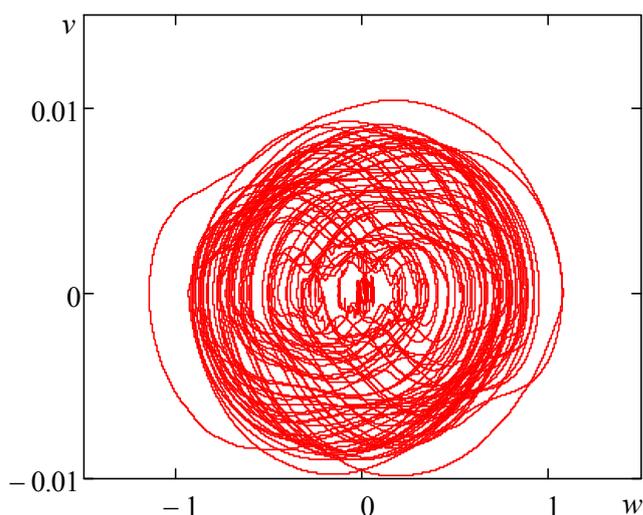


Рисунок 2 – Зависимость прогиба середины стороны  $CD$  (рисунок 1) от времени



**Рисунок 3 – Фазовый портрет: по оси абсцисс отложен прогиб середины стороны CD (рис. 1), по оси ординат – его скорость**

Эти выводы линейного анализа проверялись с использованием изложенного выше метода. И действительно, колебания в интервале 1 затухают; во втором интервале возникает характерный для автоколебаний предельный цикл – простые гармонические колебания. Выглядящий парадоксальным вывод для третьего интервала также подтверждается: колебания затухают. В четвертом интервале возникает предельный цикл, но это уже не простые, хотя и гармонические колебания. Результаты расчетов для пятого цикла (при  $M = 5.60$ ) приведены на рисунках 2, 3.

Колебания нерегулярны, траектория в фазовом пространстве запутана. Можно предположить, что в данном случае существует странный аттрактор [6]. Но это не так. Одним из признаков странного аттрактора является так называемое разбегание траекторий [6]: при малом изменении исходных данных траектории на фазовом портрете начинают (иногда через конечный интервал времени) заметно расходиться. Выполнение этого условия в данном случае проверялось, и было обнаружено, что разбегание траекторий отсутствует.

В заключение можно отметить, что сложность рассматриваемого явления – флаттера и значение его исследований для инженерной практики требуют использования методов нелинейного анализа. Знание частот и амплитуд флаттерных колебаний необходимо для прогноза усталостной прочности и управляемости летательного аппарата.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00134).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weiliang Y., Dowell E. Limit cycle oscillation of a fluttering cantilever plate // AIAA Journal. 1991. V. 29. N. 11. P. 1929-1936.
2. A modern course in aeroelasticity / Dowell E. (ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2004. 746 p.
3. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. 351 с.
4. Исаулова Т.Н., Лавит И.М. Устойчивость консольно защемленной косоугольной неоднородной пластины в сверхзвуковом потоке газа // Прикл. механика и техн. физика. 2011. Т. 52, № 4. С. 191-204.
5. Лавит И.М., Нгуен Вьет Чунг. Термоупругопластическое деформирование толстостенного цилиндра с радиальной трещиной // Прикл. механика и техн. физика. 2008. Т. 49, № 3. С. 173-183.
6. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984. 528 с.

**Лавит Игорь Михайлович**

Тульский государственный университет, кафедра математического моделирования  
300012, Тула, просп. Ленина, 92

Профессор

Тел.: (84872)33-24-88

E-mail: IgorLavit@yandex.ru

**Нгуен Ван Чьонг**

Тулский государственный университет, кафедра математического моделирования  
300012, Тула, просп. Ленина, 92  
Аспирант  
Тел.: (84872)33-24-88  
E-mail: 20021984@yandex.ru

I.M. LAVIT, NGUYEN VAN TRUONG

**SUPERSONIC NONLINEAR FLUTTER OF CANTILEVER  
RESTRAINED RECTANGULAR PLATE**

*A method of solution for rectangular plate with supersonic gas flow self-oscillations problem is proposed. Plate deformation is simulated using the von Karman theory. An interaction between plate and flow is based on the piston flow theory. Time integration is executed with Crank-Nicholson finite-difference scheme. Space integration is executed with finite element method. Compatible Bogner-Fox-Schmitt finite elements are used. Nonlinearity of problem is adjudicated with iteration procedure. Computational results are indicated that a limit cycle or irregular, but not chaotic vibrations are appeared with small aspect ratio of plate.*

**Keywords:** *aeroelasticity, von Karman plate, self-oscillations, non-linear supersonic flutter.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Weiliang Y., Dowell E. Limit cycle oscillation of a fluttering cantilever plate // AIAA Journal. 1991. V. 29. N. 11. P. 1929-1936.
2. Modern course in aeroelasticity / Dowell E. (ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2004. 746 p.
3. Strang G., Fix G.J. An analysis of the finite element method. Prentice-Hall: Englewood Cliffs. 1973. 351 s.
4. Isaulova T.N., Lavit I.M. Stability of a cantilevered skew inhomogeneous plate in supersonic gas flow // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2011. V. 52. N. 4. P. 664-675.
5. Lavit I.M., Nguyen Viet Trung. Thermoelastoplastic deformation of a thick-walled cylinder with a radial crack // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2008. V. 49. N. 3. P. 491-499.
6. Lichtenberg A.J., Lieberman M.A. Regular and stochastic motion. NY: Springer-Verlag. 1983. 528 s.

**Lavit Igor Mihailovich**

Tula State University, department of mathematical modeling  
300012, Tula, Lenin ave., 92  
Professor  
Tel: (84872) 33-24-88  
E-mail: IgorLavit@yandex.ru

**Nguyen Van Truong**

Tula State University, department of mathematical modeling  
300012, Tula, Lenin ave., 92  
Postgraduate student  
Tel: (84872)33-24-42  
E-mail: 20021984@yandex.ru

Р.Р. АБДРАХИМОВ, С.Б. САПОЖНИКОВ, А.А. ДЬЯКОНОВ

## ДИСПЕРГИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

*В работе рассмотрены проблемы диспергирования вязких суспензий эпоксидных смол с углеродными нанотрубками. Представлен способ диспергирования нанотрубок с помощью планетарного миксера и керамических мельющих тел. Проведен анализ качества диспергирования на атомно-силовом микроскопе, показавший равномерное распределение наночастиц на поверхности отвержденного материала.*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, эпоксидная смола, агломераты, планетарный миксер, диспергирование.

**Введение.** Углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие, как известно, рекордными механическими характеристиками, рассматриваются многими исследователями как эффективное средство повышения прочности, износостойкости и термостойкости композитных полимерных материалов [1-3]. Уменьшение массы изделия, вызванное улучшением его физико-механических характеристик, является актуальной задачей ресурсосбережения в промышленных масштабах. Однако ожидаемый полезный эффект часто на порядки превосходит реально наблюдаемый на практике. Это связано с малой величиной адгезии углеродных наноматериалов к полимерным матрицам и их большой склонностью к агломерации [4]. Для разрушения агломератов УНТ используют ряд методов: гомогенизаторы, коллоидные мельницы, воздействие ультразвуком, перешивание с высокими сдвиговыми усилиями [5-6], диспергирование также осуществляют с помощью акустических и электрических устройств: ультразвуковые свистки и сирены, магнитострикционные преобразователи для получения суспензий, волновые концентраторы (в виде распылительной насадки) для генерирования аэрозолей [7,8]. Данные методы не всегда позволяют установить требуемые технологические параметры, для получения требуемое качество материала, а также проверка качества дисперсии углеродных нанотрубок затруднена.

В данной работе рассмотрен один из методов диспергирования углеродных нанотрубок в вязкой среде с использованием планетарного миксера.

**Исследуемый материал.** В данной работе был использован материал ТАУНИТ-МД, который представляет собой нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка из агломератов черного цвета. Агломераты микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных трубок [9].



Рисунок 1 – УНТ Таунит-МД в просвечивающем электронном микроскопе JEOL (25000x)

Контроль параметров Таунита-МД проведен использованием просвечивающего электронного микроскопа JEOLJEM 2100 (рис. 1), параметры материала, предоставленные производителем, перечислены в таблице 1. Анализ изображений показывает, что размер одиночных УНТ в свернутом виде в 2-5 раз меньше длины расправленной УНТ.

Таблица 1 - Общая характеристика УНМ «Таунит-МД» по данным [9]

Параметры	"Таунит-МД"
Наружный диаметр, нм	8-15
Внутренний диаметр, нм	4-8
Длина, мкм	2 и более
Общий объем примесей, % (после очистки)	до 5(до 1)
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,03-0,05
Удельная геометрическая поверхность, м <sup>2</sup> /г	300-320 и более
Термостабильность, °С	до 600

По данным электронной микроскопии величина наружного диаметра УНТ составляет от 10 до 50 нм, внутреннего диаметра от 3 до 8 нм, длина более 2 мкм.

**Диспергирование.** Перемешивание УНТ проводилось с помощью миксера KURABO Mazerustar kk250 (рисунок 2), в режиме 9-8, что соответствует вращению платформы со скоростью 1700 об/мин. и контейнера 1580 об/мин. Нанотрубки массовой долей 1% были помещены в эпоксидную смолу ЭД-20 [10], для лучшей обработки в суспензию были добавлены шарики оксида циркония (ZnO<sub>2</sub>), диаметром 1,2-1,5 мкм, общей массой равной массе смеси. Шарики в результате вращения в емкости создают сдвиговые усилия, способствующие разрушению агломератов и равномерному распределению нанотрубок в эпоксидной смоле.

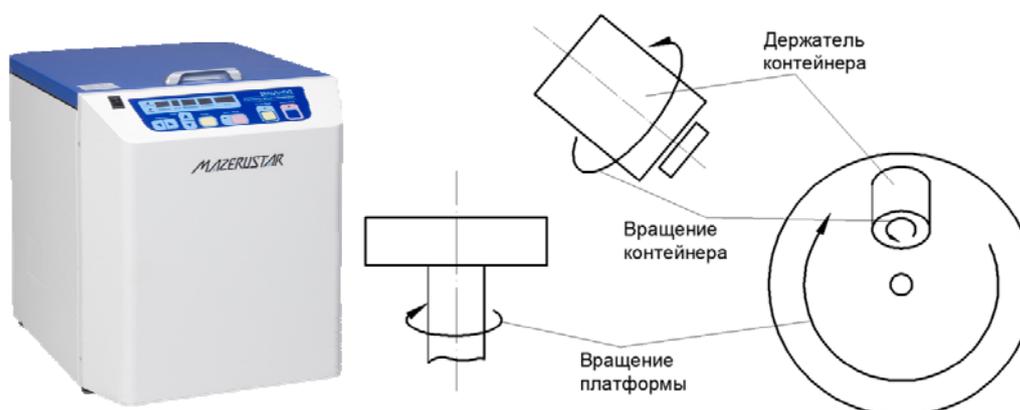


Рисунок 2 – Миксер KURABO Mazerustar kk250 и принцип работы

Время для достижения лучшего качества диспергирования было определено опытным путем с проверкой на атомно-силовом микроскопе (рис. 3-4), на площадке 20x20 мкм. Диспергирование проводилось в течение четырех промежутков времени: 10с, 50с, 100с и 150с.

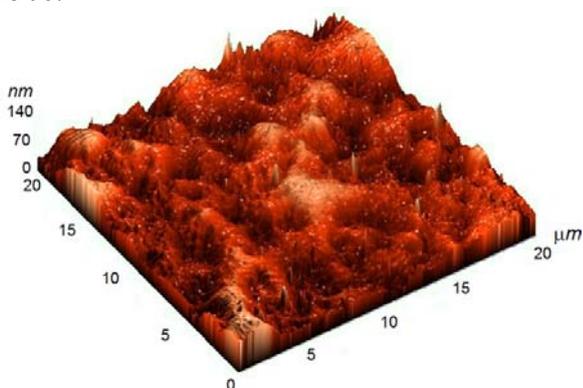


Рисунок 3 – Поверхность отвержденного материала после 10 секунд обработки в планетарном миксере

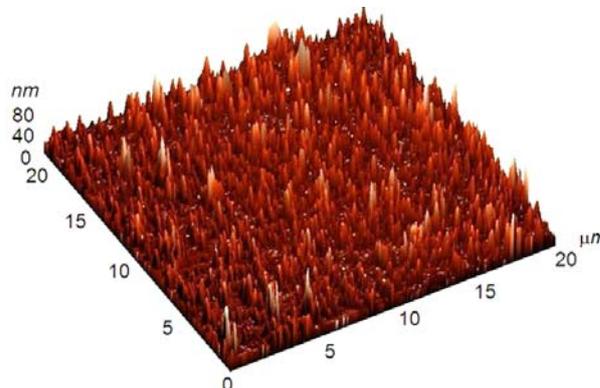


Рисунок 4 – Поверхность отвержденного материала после 150 секунд обработки в планетарном миксере

Судя по полученным снимкам, с увеличением времени диспергирования высота неровностей уменьшается (со 150 нм до 80 нм), и при этом распределения твердых частиц УНТ (острые пики) становится более равномерно.

**Выводы.** В работе рассмотрены проблемы диспергирования высоковязких суспензий эпоксидных смол с углеродными нанотрубками. Продемонстрирован способ диспергирования УНТ в вязкой среде с помощью планетарного миксера и определены необходимые технологические параметры. Проверка на атомно-силовом микроскопе показала равномерное распределение твердых частиц и уменьшение их высоты над поверхностью отвержденного материала после обработки в течение 150 секунд.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-873.2014.8.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis D.C. Improvement in Mechanical Properties for a Carbon Fiber Epoxy Composite Laminate due to Nanotube Science and Technology / D.C. Davis, J.W. Wilkerson, J. Zhu, D.O.O. Ayewah // Composite Structures. - 2010. - Vol. 92. - P. 2653-2662.
2. Long X. Single-Walled Carbon Nanotubes Functionalized with High Bonding Density of Polymer Layers and Enhanced Mechanical Properties of Composites /X. Long// Macromolecules. -2007. - Vol. 40.- P. 3296-3305.
3. The effect of carbon nanotube orientation on erosive wear resistance of CNT-epoxy based composites / [J. Chen](#), [I. M. Hutchings](#), [T. Deng](#), [M. S.A. Bradley](#), [K.K. Koziol](#) // [Carbon](#). – 2014. – **Vol. 73**. P. 421–431.
4. Liu L.Q. Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes / L.Q. Liu, H.D. Wagner // Comp. Sci. Techn. - 2005. - Vol. 65. - P. 1861-1868.
5. Fabrication of Carbon Multiwall Nanotube/Polymer Composites by Shear Mixing/ R. Andrews, D. Jacques, M. Minot, T. Rantell // Macro Mater Eng, - 2002, Vol 287, pp. 395–403.
6. Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: Enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content / F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte // Compos Sci. Technol, 2004, Vol. 64, pp. 2363–2371.
7. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избр. труды/ П. А. Ребиндер. - М.:Наука, 1979. -368 с.
8. Аввакумов, Е. Г., Механические методы активации химических процессов/ Е. Г. Аввакумов. Новосибирск: Наука, 1989. - 306 с.
9. Углеродный наноматериал «Таунит МД» [http://nanotc.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=8&Itemid=34](http://nanotc.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=34).
10. ГОСТ 10587-84: Смолы эпоксидно-диановые неутвержденные ТУ.

### **Абдрахимов Руслан Рамильевич**

ЮУрГУ, г. Челябинск  
Аспирант  
454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76  
Тел. моб.: +7-951-781-99-77  
E-mail: Ryslan90@gmail.com

### **Сапожников Сергей Борисович**

ЮУрГУ, г. Челябинск  
Д-р технических наук, профессор  
454080, г. Челябинск, пр-т Ленина 76  
Тел. раб.: +7(351) 267-91-19  
E-mail: ssb@susu.ac.ru

### **Дьяконов Александр Анатольевич**

ЮУрГУ, г. Челябинск  
Д-р технических наук, профессор 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина 76  
Тел. раб.: +7(351) 248-34-14  
E-mail: sigma-80@mail.ru

---

R.R. ABDRAKHIMOV, S.B. SAPOZHNIKOV, A. A. DYAKONOV

## DISPERSION CARBON NANOTUBES IN A VISCOUS MEDIUM

*The paper discusses the problem of dispersion of viscous suspensions of epoxy resins with carbon nanotubes. Presents a method of dispersing nanotubes using a planetary mixer and ceramic chalking bodies. The analysis of the quality of dispersion on an atomic force microscope, which showed a uniform distribution of the nanoparticles on the surface of the cured material.*

**Keywords:** carbon nanotubes, epoxy resin, agglomerates, planetary mixer, dispersion.

### BIBLIOGRAPHY

1. Davis D.C. Improvement in Mechanical Properties for a Carbon Fiber Epoxy Composite Laminate due to Nanotube Science and Technology / D.C. Davis, J.W. Wilkerson, J. Zhu, D.O.O. Ayewah // Composite Structures. - 2010. - Vol. 92. - P. 2653-2662.
2. Long X. Single-Walled Carbon Nanotubes Functionalized with High Bonding Density of Polymer Layers and Enhanced Mechanical Properties of Composites /X. Long// Macromolecules. -2007. - Vol. 40.- P. 3296-3305.
3. The effect of carbon nanotube orientation on erosive wear resistance of CNT-epoxy based composites / J. Chen, I. M. Hutchings, T. Deng, M. S.A. Bradley, K.K. Koziol // Carbon. – 2014. – Vol. 73. R. 421–431.
4. Liu L.Q. Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes / L.Q. Liu, H.D. Wagner // Comp. Sci. Techn. - 2005. - Vol. 65. - P. 1861-1868.
5. Fabrication of Carbon Multiwall Nanotube/Polymer Composites by Shear Mixing/ R. Andrews, D. Jacques, M. Minot, T. Rantell // Macro Mater Eng, - 2002, Vol 287, pp. 395–403.
6. Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: Enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content / F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte // Compos Sci. Technol, 2004, Vol. 64, pp. 2363–2371.
7. Rebinder, P. A. Poverhnostnye javlenija v dispersnyh sistemah. Fiziko-himicheskaja mehanika. Izbr. trudy/ P. A. Rebinder. - M.:Nauka, 1979. -368 s.
8. Avvakumov, E. G., Mehanicheskie metody aktivacii himicheskikh processov/ E. G. Avvakumov. Novosibirsk: Nauka, 1989. - 306 s.
9. Uglernodnyj nanomaterial «Таунит MD» [http://nanotc.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=8&Itemid=34](http://nanotc.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=34).
10. GOST 10587-84: Smoly jepoksidno-dianovye neutverzhdennye TU.

#### **Abdrakhimov Ruslan Ramilievich**

SUrSU, Chelyabinsk

Graduate student, Department of Applied Mechanics, Dynamics and strength of machines

454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect 76

Tel. mob.: +7-951-781-99-77

E-mail: Ryslan90@gmail.com

#### **Sapozhnikov Sergei Borisovich**

SUrSU, Chelyabinsk

Dr. Tech. Sc., Prof. of Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines department

454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect 76

Tel. slave.: +7 (351) -267-91-19

E-mail: ssb@susu.ac.ru

#### **Dyakonov Aleksandr Anatolyevich**

SUrSU, Chelyabinsk

Dr. Tech. Sc., Prof. of Mechanical Engineering department

454080, Chelyabinsk, Lenin prospect, 76,

Phone: (351) 248-34-14

E-mail: sigma-80@mail.ru

УДК 539.42

А.В. МИХЕЕВ, Ю.С. СТЕПАНОВ, Г.В. БАРСУКОВ, Т.А. ЖУРАВЛЕВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ВНЕДРЕНИИ В ПРЕГРАДУ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

*The authors obtained the equations of stress-strain state of the solid particles in the supersonic contact with the semi-infinite barrier.*

**Keywords:** penetration, destruction, contact interaction, a barrier, a particle

При резании материалов сверхзвуковой двухфазной струей (гидроабразивное резание) струя жидкости с абразивом истекает из сопла малого диаметра (0,8 - 2 мм) под давлением 200 - 500 МПа, обладая при этом сверхзвуковой скоростью и кинетической энергией, достаточной для выполнения резания неметаллических материалов толщиной до 350 мм, металлов - до 150 мм.

Свойства и характеристики применяемого абразивного зерна значительно влияют на скорость подачи сопла относительно материала и определяют интенсивность разрушения. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что значительное повышение (в 10 раз) производительности резания высокопрочных материалов обеспечивает более твердый абразив корунд.

Если возникающие в зерне напряжения превышают предел прочности абразивного материала, то зерно разрушается, контакт перестает существовать, а эффективность резания снижается.

В месте контактного взаимодействия напряжение в сечении твердой частицы становится больше критического, происходит хрупкое разрушение бойка под действием упругой деформации, с образованием магистральной, опережающей трещины.

В дальнейшем впереди магистральной трещины возникают и растут по разным направлениям и на разных близких уровнях вторичные трещины, образуя при встрече фронтов с магистральной и другими вторичными трещинами линии «скола». Глубина распространения этих трещин будет зависеть от степени напряженного деформируемого состояния твердой частицы, определяемой энергетическими условиями процесса.

Оценку возможности зарождения трещины, в каком либо направлении можно сделать на основе решения задачи линейной теории упругости и анализе напряженно-деформированного состояния [1].

Пусть на поверхности твердой частицы действует произвольная распределенная нагрузка (рисунок 1).

Для упрощения решения переведем в полярную систему координат.

Запишем граничные условия для поверхности твердой частицы в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=0} = -q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta}|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases} \quad (1)$$

Решение плоской задачи теории упругости может быть сведено к определению функции напряжений  $\Phi(r, \theta)$  по значениям нагрузки на поверхности частицы.

Так как функция Эри должна удовлетворять бигармоническому уравнению:

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r, \theta) = 0,$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$  - гармонический оператор Лапласа в полярных координатах.

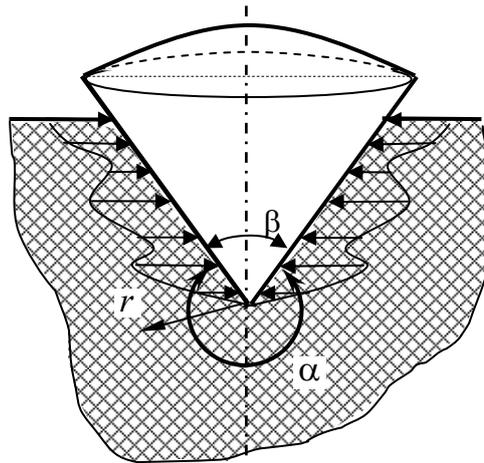


Рисунок 1 - Схема к анализу напряжений на поверхности твердой частицы

Для определения функции напряжений  $\Phi$  можно применить метод разделения переменных. Тогда для функции напряжений запишем:

$$\Phi(r, \theta) = f(r)\varphi(\theta). \quad (2)$$

Напряжения в полярной системе координат определяются равенствами:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Учитывая (2), выражения для напряжений можно записать в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\varphi(\theta)}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} + \frac{f(r)}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi(\theta)}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Подставив граничные условия (1) в (4) и опуская знаки, получим:

$$\begin{cases} q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Так как на поверхности частицы значения  $\varphi(\theta)$  постоянны, то можно записать что:

$$q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}. \quad (6)$$

Второе уравнение в системе (5) не определено, а первое, опуская  $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , можно переписать в виде:

$$q(r) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}.$$

Представим нагрузку  $q(r)$ , действующую на поверхности частицы в виде степенного ряда:

$$q(r) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n,$$

тогда:

$$f(r) = K \int \left[ \int q(r) dr \right] dr, \tag{7}$$

или

$$q(r) = K \int \left[ \int \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n dr \right] dr.$$

Тогда с учетом (6), функция напряжений в общем виде принимает следующий вид:

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \int \left[ \int q(r) dr \right] dr, \tag{8}$$

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \int \left[ \int \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n dr \right] dr. \tag{9}$$

Используя общее выражение функции Эри в полярной системе координат, запишем функцию напряжений:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & A\theta + A_0 r^2 \ln r + B_0 r^2 + C_0 \ln r + D_0 r^2 \theta + (A_1 r^3 + B_1 r \ln r + C_1 r^{-1}) \cos(\theta) + Br\theta \sin(\theta) + \\ & + (A_1 r^3 + B_1 r \ln r + C_1 r^{-1}) \sin(\theta) + Br\theta \cos(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2} + C_{3n} r^{-n+2}) \cos(n\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2} + D_{3n} r^{-n+2}) \sin(n\theta). \end{aligned} \tag{10}$$

Уравнения закона Гука в ортогональных криволинейных координатах имеют такой же вид, что и в декартовых координатах. Поэтому в случае плоского напряженного состояния

$$\text{имеем: } \begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu \sigma_{\theta\theta}), \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu \sigma_{rr}), \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{r\theta}. \end{cases} \tag{11}$$

Полученные зависимости между компонентами тензора деформации и компонентами вектора перемещения можно записать в полярных координатах:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \\ \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right), \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu \sigma_{\theta\theta}) = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu \sigma_{rr}) = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \\ \frac{1+\nu}{E} \sigma_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \end{cases}$$

Применяя (2.50), получим:

$$\begin{cases} \frac{1}{E} \left[ \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \right] = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \frac{1}{E} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \nu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right] \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \\ \frac{1+\nu}{E} \left[ -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) \right] = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \end{cases} \quad (12)$$

Полученное выражение функции напряжений позволяет определить перемещения, деформации и напряжения.

Рассмотрим пример решения.

Пусть на проникающее тело единичной толщины с углом при вершине  $2\beta$  действует распределенная нагрузка:  $q(r) = q_0 r$ .

Следуя приведенному алгоритму, запишем граничные условия:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=0} = -q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q_0 r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases}$$

Так как  $0 \leq r \leq \infty$ , то, учитывая (2), (5), (6), (7), можно записать для данной нагрузки функцию напряжений в виде:  $\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \int \left[ \int q_0 r dr \right] dr$ . (13)

Произведя интегрирование по  $r$ , получим:  $\Phi(r, \theta) = [r^3 + Ar + B] q_0 \varphi(\theta)$ . (14)

Для односвязных областей в (11) можно положить что  $A$  и  $B$  равны нулю.

Тогда:  $\Phi(r, \theta) = q_0 r^3 \varphi(\theta)$ . (15)

Из общего выражения для функции напряжений (9) выбираем слагаемые, удовлетворяющие условию (15):

$$\Phi(r, \theta) = A_1 r^3 \cos(\theta) + A_1' r^3 \sin(\theta) + C_1 r^3 \cos(3\theta) + D_1 r^3 \sin(3\theta), \quad (16)$$

где  $A_1, A_1', C_1, D_1$  - произвольные постоянные, определяемые из условия нагружения.

Используя (3), запишем выражения для напряжений:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2A_1' r \sin(\theta) + 2A_1 r \cos(\theta) - 6C_1 r \sin(3\theta) - 6D_1 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{\theta\theta} = 6A_1' r \sin(\theta) + 6A_1 r \cos(\theta) + 6C_1 r \sin(3\theta) + 6D_1 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{r\theta} = -2A_1' r \cos(\theta) + 2A_1 r \sin(\theta) - 6C_1 r \cos(3\theta) + 6D_1 r \sin(3\theta) \end{cases} \quad (17)$$

Полученное выражение удовлетворяют (12), (13), и решение справедливо при  $0 < \alpha < 2\pi$ ,  $0 < \alpha < 2\pi$ .

Используя полученные уравнения (17) приведен расчет радиальных, тангенциальных и касательных напряжений (рисунок 2).

**Выводы.** Таким образом, полученные уравнения напряженно-деформированного состояния дают возможность сделать оценку зарождения трещины в твердой частице при контактно-взаимодействии с полубесконечной преградой.

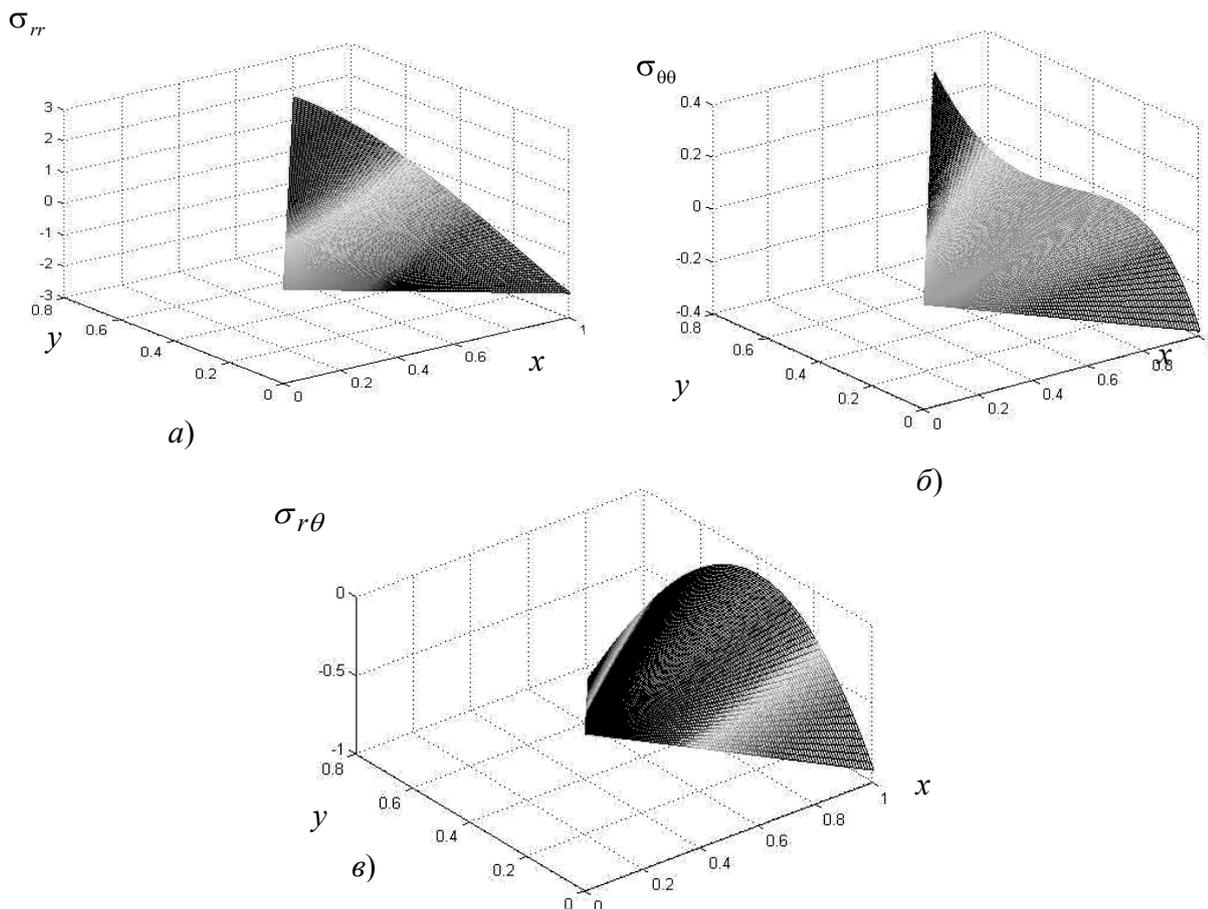


Рисунок 2 - Распределение напряжений по плоскости сечения твердой частицы:  
 а – радиальные, б – тангенциальные, в - касательные

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков, Г.В. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 6 – С. 15- 20.
2. Барсуков, Г.В. Повышение эффективности гидроабразивного резания путем направленной вибрации материала вдоль линии реза [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин, А.В. Воронков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 2-2. - 2012. – С. 53 – 63.
3. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки [Текст] / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение». -2011.-№4.- с. 46-54.
4. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. - С. 9 – 14.
5. Барсуков Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей [Текст] / Г.В. Барсуков, А.А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 2-3. - 2012. – С. 74 – 81.
6. Степанов, Ю.С. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 4-2. – 2010. – С. 65 – 70.
7. Журавлева, Т.А. Исследование влияния технологических режимов гидроабразивного резания на расслоение поверхности деталей из стеклотекстолита [Текст] / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 4. С. 47 – 56.
8. Михеев, А.В. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2 -5. С. 53 – 63.
9. Барсуков, Г.В. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц [Текст] / Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев. - М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 152 с.

10. Михеев, А.В. Математическое моделирование процессов сверхзвукового удара и проникания тел в металлические преграды / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.

11. Степанов, Ю.С. Численное моделирование напряженно-деформированное состояние сферического индентора при сверхзвуковом ударном взаимодействии с преградой [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 2-3. – 2010. – С. 3–8.

**Михеев Александр Васильевич**  
Государственный университет УНПК, г. Орел  
К.т.н., докторант  
Тел. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Степанов Юрий Сергеевич**  
Государственный университет - УНПК, д.т.н., профессор, директор НОЦ «ОрелНано»  
Тел. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Барсуков Геннадий Валерьевич**  
Государственный университет - УНПК, д.т.н., профессор, зав. кафедрой КТОМП  
Тел. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Журавлева Татьяна Александровна**  
Государственный университет - УНПК, аспирант кафедры КТОМП  
Тел. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

A.V. MIKHEEV, Y.S. STEPANOV, G.V. BARSUKOV, T.A. ZHURAVLEVA  
**MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF SOLIDS DURING INTRODUCTION INTO OBSTACLES AT SUPERSONIC SPEEDS**

*The authors obtained the equations of stress-strain state of the solid particles in the supersonic contact with the semi-infinite barrier.*

**Keywords:** penetration, destruction, contact interaction, a barrier, a particle

**BIBLIOGRAPHY**

1. Barsukov, G.V. Sovremennye tehnologii gidro- i gidroabrazivnoj obrabotki zagotovok [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Aljushin // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. – 2012. – № 6 – S. 15- 20.
2. Barsukov, G.V. Povyshenie jeffektivnosti gidroabrazivnogo rezanija putem napravlennoj vibracii materiala vdol' linii reza [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Aljushin, A.V. Voronkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – № 2-2. - 2012. – S. 53 – 63.
3. Galinovskij, A.L. Minimizacija tehnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezanija s uche-tom stoimostnyh i tehnologicheskikh parametrov processa obrabotki [Tekst] / A.L. Galinovskij, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij «Mashinostroenie». -2011.-№4.- s. 46-54.
4. Barsukov, G.V. Opredelenie proizvoditel'nosti gidroabrazivnogo rezanija s uchetom harakteristik abrazi-vnogo zerna [Tekst] / G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. - 2008. - № 1. - S. 9 – 14.
5. Barsukov G.V. Opredelenie komponentnogo sostava mass abrazi-vnoj smesi dlja rezanija materialov sverhzvukovoj gidroabrazivnoj struej [Tekst] / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov // Fundamental'nye i pri-kladnye problemy tehniki i tehnologii. – № 2-3. - 2012. – S. 74 – 81.
6. Stepanov, Ju.S. Modelirovanie razrushenija mnogoslnoj pregrady s gazovym zazorom pod dejstvi-em sverhzvukovogo strujnogo potoka svobodnyh abrazi-vnyh chastic [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 4-2. – 2010. – S. 65 – 70.
7. Zhuravleva, T.A. Issledovanie vlijanija tehnologicheskikh rezhimov gidroabrazivnogo rezanija na ras-sloenie poverhnosti detalej iz steklotekstolita [Tekst] / G.V. Barsukov, T.A. Zhuravleva // Fundamental'nye i prikladnye prob-lemy tehniki i tehnologii. – 2013. – № 4. S. 47 – 56.
8. Miheev, A.V. Vlijanie parametrov techenija sverhzvukovoj gidroabrazivnoj strui na geometricheskiju formu poverhnosti razrushenija pregrady [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Fundamen-tal'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2 -5. S. 53 – 63.
9. Barsukov, G.V. Razrushenie pregrady sverhzvukovym potokom svobodnyh abrazi-vnyh chastic [Tekst] / G.V. Barsukov, Ju.S. Stepanov, A.V. Miheev. - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 152 с.
10. Miheev, A.V. Matematicheskoe modelirovanie processov sverhzvukovogo udara i pronikanija tel v metal-licheskie pregrady / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.
11. Stepanov, Ju.S. Chislennoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie sfericheskogo ind-entora pri sverhzvukovom udarnom vzaimodejstvii s pregradoj [Tekst] / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.A. Alek-sandrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 2-3. – 2010. – S. 3 – 8.

**Alexander Mikheev**  
State University - ESPC,  
Ph.D.  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Yuri Stepanov**  
State University - ESPC,  
Professor, Director of the Re-search and Educational Cen-ter"OrelNano"  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Gennady V. Barsukov**  
State University - ESPC,  
Professor, Head. Depart-ment KТОМП  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Tatiana Zhuravleva**  
State University - ESPC,  
Ph.D., assistant professor of chemistry  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 629.735

А.А. ГОРБУНОВ, А.Д. ПРИПАДЧЕВ

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРЫЛА ВОЗДУШНОГО СУДНА**

*В представленной статье рассмотрен процесс имитационного моделирования для дополнительных аэродинамических поверхностей крыла магистрального воздушного судна. В результате применения имитационного моделирования в процессе проектирования дополнительной аэродинамической поверхности крыла получены экспериментальные данные, по которым можно проследить поведение модели с изменением времени, определить требуемые параметры при заданных конструктивно–геометрических и аэродинамических характеристиках, а так же изучить свойства модели при заданной геометрии.*

**Ключевые слова:** *дополнительная аэродинамическая поверхность; воздушное судно; автоматизированное проектирование; имитационное моделирование.*

При проектировании дополнительных аэродинамических поверхностей крыла для магистрального воздушного судна (ВС) необходимо изучение поведения моделей (квазиобъектов) дополнительных аэродинамических поверхностей крыла, отражающих свойства дополнительной аэродинамической поверхности, установленных на магистральное ВС, участвующее в процессе пассажирских перевозок. Причем модели дополнительных аэродинамических поверхностей на этапе эскизного проектирования представлены спецификацией (под спецификацией принято считать математические модели, при условии, что они формализованы). Таким образом, имитационная модель – это алгоритмическая поведенческая модель, а имитационное моделирование представляет собой процесс, направленный на изучение свойств и поведения модели для понимания того, как это возможно в действительности. Применение имитационного моделирования дает возможность проводить вычислительные эксперименты на основе разработанной модели, позволяющей проследить изменение ее поведения в течение времени при заданных начальных условиях [2, 5].

В результате применения имитационного моделирования в проектировании дополнительной аэродинамической поверхности крыла получим экспериментальные данные, по которым можно проследить поведение модели с изменением времени, определить требуемые параметры при заданных конструктивно–геометрических и аэродинамических характеристиках, а так же изучить свойства модели при заданной геометрии.

Основной целью применения имитационного моделирования дополнительных аэродинамических поверхностей крыла является определение аэродинамических характеристик дополнительной аэродинамической поверхности крыла устанавливаемой на магистральное ВС, участвующее в процессе пассажирских перевозок при конструктивно–геометрических параметрах заданных на этапе эскизного проектирования, для их последующего уточнения.

Имитационное моделирование дополнительных аэродинамических поверхностей проводится с использованием программного продукта, предназначенного для решения CAE задач, а именно задачи вычислительной аэро– и гидродинамики (CFD). Для проведения имитационного моделирования выбран программный продукт SALOME предназначенный для решения задач вычислительной аэро– и гидродинамики [6]. SALOME представляет собой открытую интегральную программную платформу для выполнения численных расчетов и ими-

тационного моделирования. Пользовательский интерфейс программы вычислительной аэро- и гидродинамики CFD в SALOME позволяет:

- задавать исходные данные и просматривать результаты непосредственно в окне графического проектирования;
- обладает понятным пользователю интерфейсом;
- требует минимального времени на подготовку данных и просмотр результатов эксперимента.

Используемая САПР является конечно-элементным пре-постпроцессором, являющимся ядром вычислительной системы, вокруг которого объединяется множество CAE решателей. Так же SALOME позволяет разрабатывать собственные программные решения, что и было сделано [4], рисунок 1. В результате была разработана программа для исследования и расчета аэродинамических характеристик летательного аппарата. Разработанная программа на базе CAE решателя Open FOAM (анализ течения жидкостей и газов) позволила провести имитационное моделирование дополнительных аэродинамических поверхностей крыла для магистральных ВС.

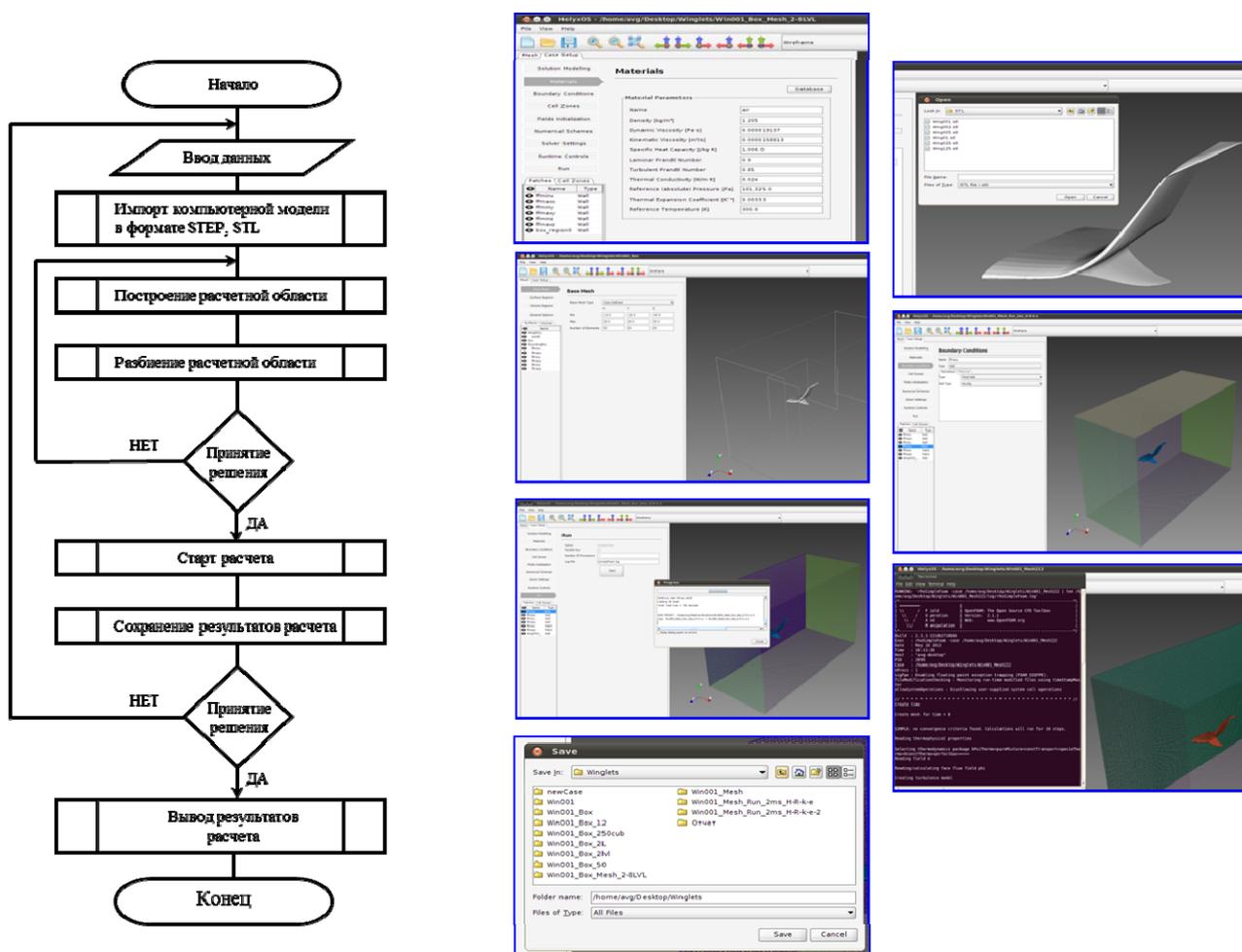


Рисунок 1 – Алгоритм и экранные формы программы исследования и расчета аэродинамических характеристик дополнительной аэродинамической поверхности крыла ВС

Программный модуль написан на языке программирования C++, с использованием операционной системы Linux. Для выполнения поставленной цели в рамках имитационного моделирования эскизное проектирование и разработка аэродинамических 3D моделей дополнительных аэродинамических поверхностей крыла было выполнено в системе CATIA [7]. Использование САПР CATIA обусловлено тем, что система обладает функцией гибридного

проектирования, сочетая в себе как поверхностные, так и твердые элементы в одной модели. Немаловажным явилось и то, что система обладает возможностью свободной параметризации и позволяет производить построение моделей по ранее созданным чертежам, рисунок 2.

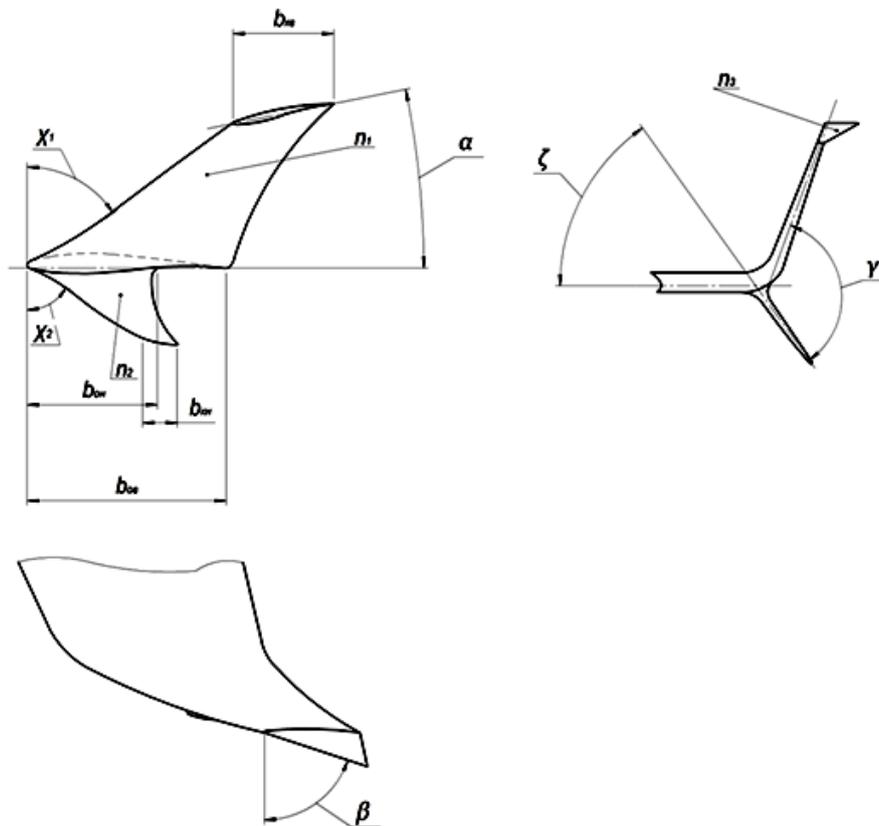


Рисунок 2 – Общий вид дополнительной аэродинамической поверхности, патент № 2481242

По разработанному ранее чертежу общего вида дополнительной аэродинамической поверхности была построена ее 3D модель, рисунок 3.

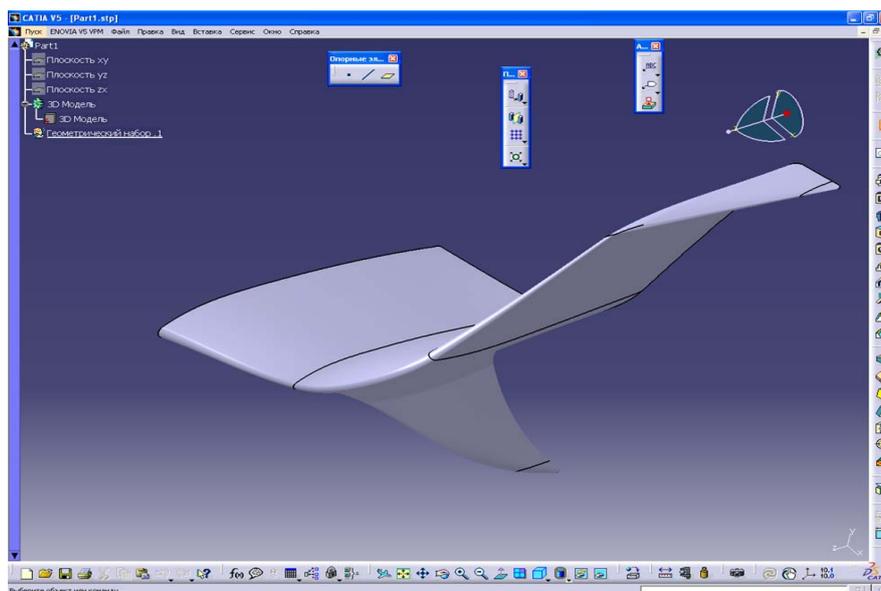
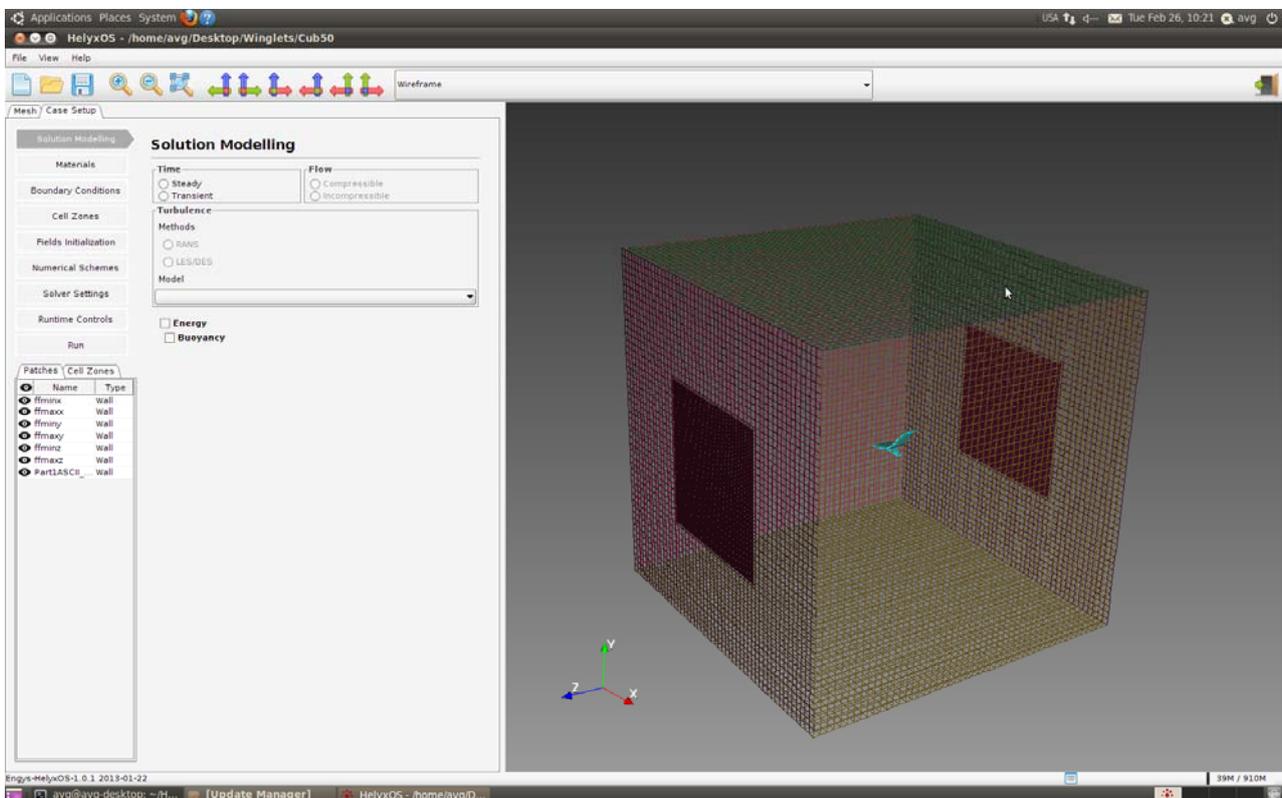


Рисунок 3 – Диалоговое окно системы CATIA, в которой представлена 3D модель дополнительной аэродинамической поверхности крыла, патент № 2481242

Разработанная 3D модель была преобразована в формат STEP, позволяющий проводить имитационное моделирование в программе САПР SALOME. Формат STEP дает возможность описывать аэродинамические поверхности, полученные на основе математической модели используемой в программе САПР. Выбор формата данных STEP был определен исходя из требований программного обеспечения используемого для проведения имитационного моделирования.

По рисунку 3 видно, что все сопрягаемые части дополнительной аэродинамической поверхности, а именно сопряжения между рабочими поверхностями имеют плавные зализы с заданными радиусами. Получение точных аэродинамических форм стало возможным, благодаря использованию высокоуровневой САД системы CATIA.

Решаемая задача вычислительной аэро– и гидродинамики сводится к анализу воздействия текучей среды на тело. Для расчета необходимо задать исходные данные в виде граничных и начальных условий. Тело ограничивается поверхностями, которые ограничивают область распространения текучей среды. Такие условия называются Wall (Стеной). В соответствии с тем, что для дополнительной аэродинамической поверхности применяется случай внешнего обтекания, для которого характерны такие параметры как скорость, давление, температура и др., данный тип называется Ambient Conditions (Внешние условия). В соответствие с заданными условиями будет решаться задача типа External (внешняя). Таким образом, расчетное пространство ограничено с одной стороны областью заданными границами в виде стенок, образующих прямоугольный пустотелый параллелепипед и твердотельной моделью дополнительной аэродинамической поверхности, помещенной в пустотелый параллелепипед. Размер расчетной области определяется как автоматически, так и может задаваться пользователем. В данном случае, расчетная сетка построена пользователем, что позволило получить более точное решение математической задачи путем использования более мелкой расчетной сетки в расчетной области, рисунок 4.



*Рисунок 4 – Расчетная область*

Таким образом, представленная на рисунке 4 расчетная область представляет собой пространственный куб, в который помещена 3D модель дополнительной аэродинамической поверхности крыла магистрального ВС, причем по осям OY и OX вокруг модели установлены граничные условия Wall в виде четырех граней, а по оси OZ установлены начальные условия, графически отображаемые в виде двух граней спереди и сзади 3D модели, рисунок 5.

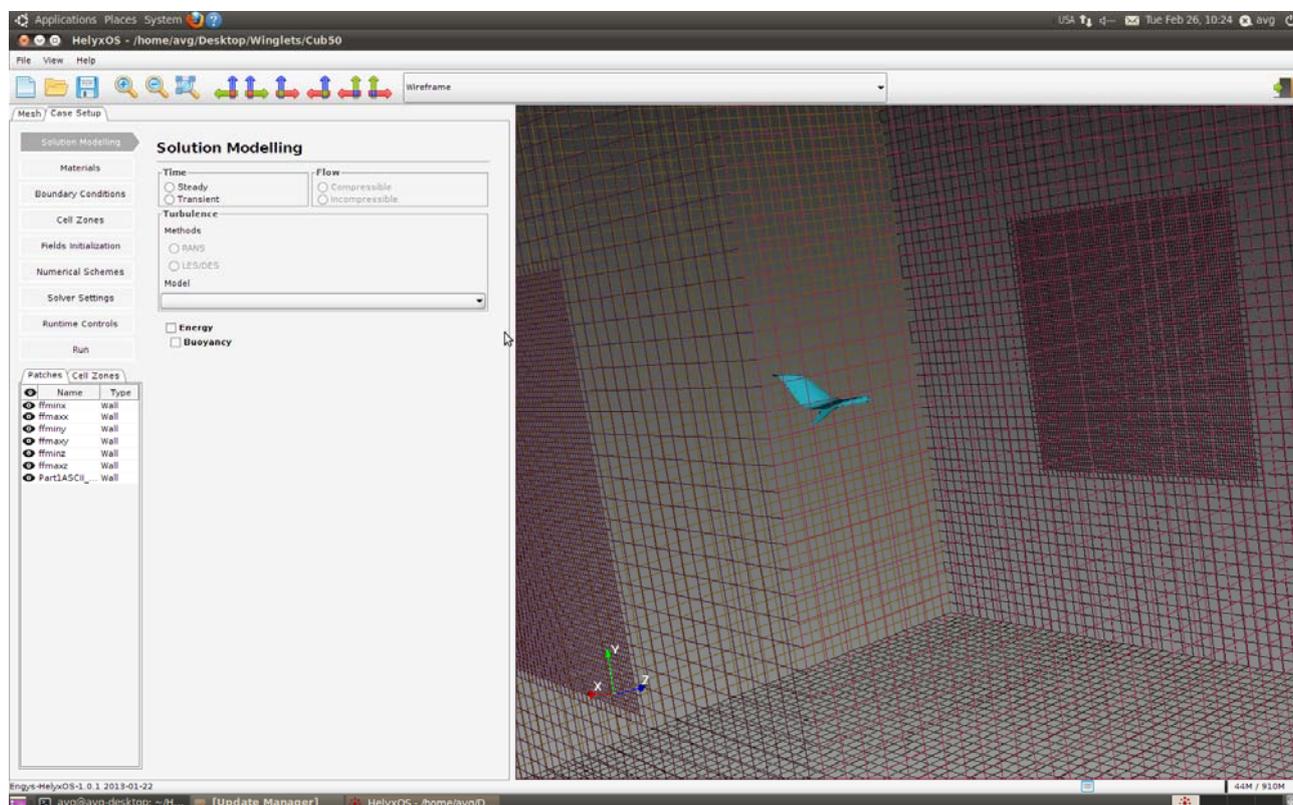


Рисунок 5 – Укрупненное отображение расчетной области

Граничные и начальные условия заданы в соответствии с условиями, в которых будет находиться дополнительная аэродинамическая поверхность в натуральном масштабе. Начальное условие в виде грани находящейся перед дополнительной аэродинамической поверхностью в программе обозначаются как (Inlet), а грань, расположенная за дополнительной аэродинамической поверхностью называется (Outlet) т.е. выходной параметр. Задавая условия Inlet и Outlet, тем самым мы определяем характер течения текучей среды в расчетной области. Для исключения влияния граничных условий Wall на модель дополнительной аэродинамической поверхности, с целью устранения вихреобразования около граней Wall, для них задано движение со скоростью потока по направлению текучей среды. Параметры текучей среды задаются в соответствующем диалоговом окне.

Кроме параметров воздушной среды и начальных условий, задаем модель турбулентности, наиболее подходящую к текущему расчетному случаю. В нашем случае выбрана модель турбулентности k- $\epsilon$ , которая наиболее часто используется при решении инженерных задач на практике.

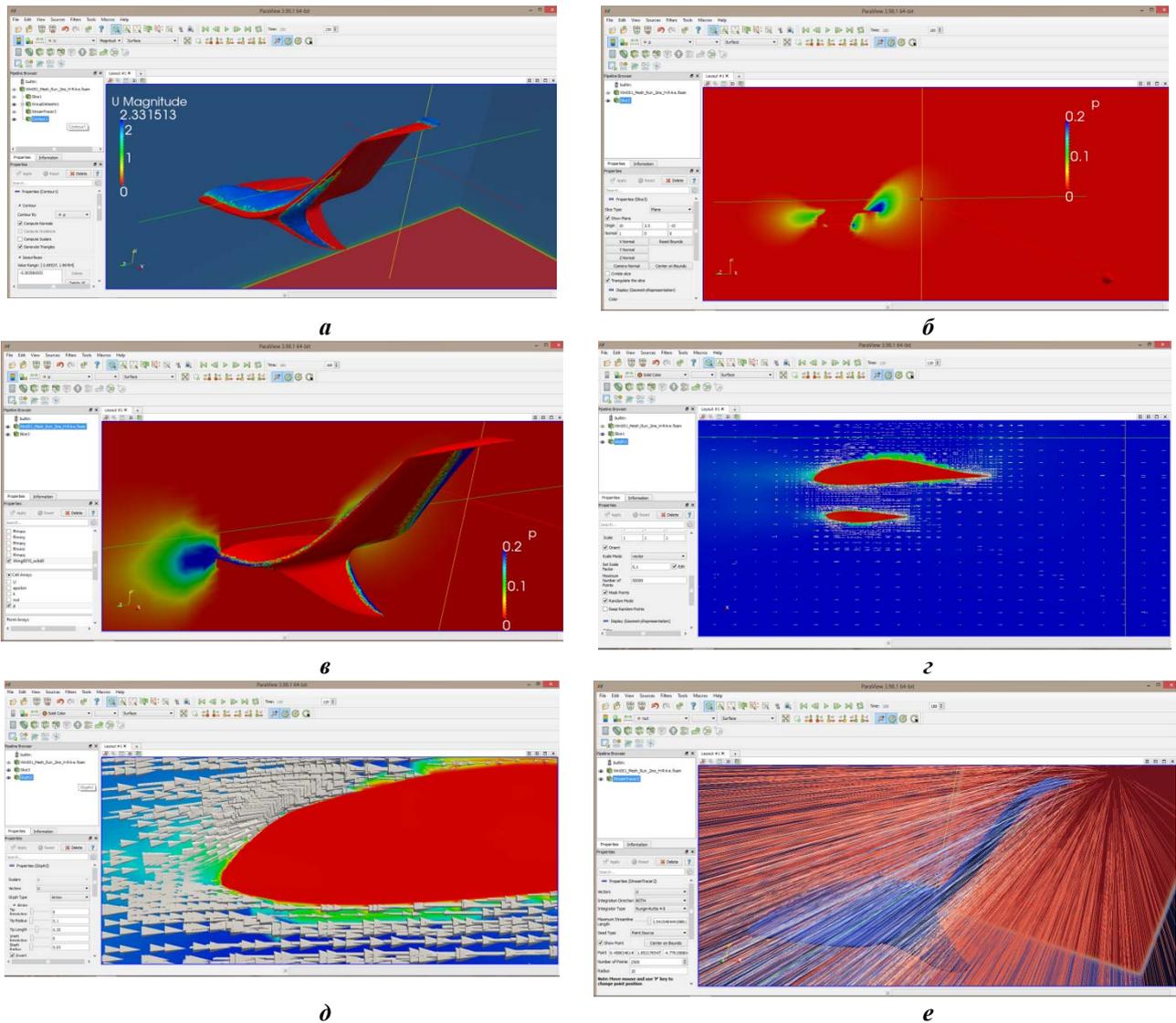
Решаемая задача вычислительной аэро- и гидродинамики для дополнительной аэродинамической поверхности крыла выполнена для изучения движения текучей среды около тела, решение которой посредством САПР дает параметры, описывающие течение текучей среды, а именно: скорость, давление, температуру и др.

Процесс имитационного моделирования дополнительной аэродинамической поверхности крыла магистрального ВС в CFD программе SALOME был реализован в течение вре-

мени равного 200 расчетным шагам. Количество расчетных шагов задается пользователем и выбирается из следующих соображений:

- получение достаточного объема информации;
- получение экспериментальных данных при установившемся процессе обтекания текучей средой исследуемой модели.

В результате многократно проводимых продувок в CFD программе было установлено, что устойчивый процесс обтекания, наблюдается, начиная с 65 расчетного шага, а количество итераций в 200 расчетных шагов выбрано исходя из объема полученной информации в размере 250 Гб. Дальнейшее увеличение объема полученной информации не требуется, так как полученного количества достаточно для принятия решения. Результаты имитационного моделирования отражают один и тот же момент времени, соответствующий расчетному шагу № 180, рисунок 6.



**Рисунок 6 – Результаты имитационного моделирования для дополнительной аэродинамической поверхности крыла ВС:**

*а – изменение скорости распределения текучей среды по поверхности дополнительной аэродинамической поверхности крыла; б – распределение давления в сечении дополнительной аэродинамической поверхности; в – распределение давления по дополнительной аэродинамической поверхности; г – векторное движение частиц текучей среды в сечении дополнительной аэродинамической поверхности; д – векторное движение частиц текучей среды в сечении концевой части крыла; е – обтекание потоком текучей среды дополнительной аэродинамической поверхности*

Характер обтекания для дополнительной аэродинамической поверхности крыла, патент № 2481242, следующий: при обтекании потоком текучей среды крыла происходит перетекание среды с нижней плоскости крыла на верхнюю, при этом на концевой шайбе 1, снабжённой дополнительной аэродинамической стреловидной поверхностью 2 малого удлинения с острой передней кромкой 3, смонтированной с внешней стороны концевой шайбы 1, образуется поле вертикальных скосов, трансформирующееся в устойчивое вихревое течение с образованием конического вихря на передней кромке 3 дополнительной аэродинамической поверхности 2, установленной на концевой шайбе 1, рисунок 7. На нижней вертикальной аэродинамической поверхности 8 поле вертикальных скосов из – за малого удлинения нижней поверхности не приводит к преждевременному образованию вихря на передней кромки 9, а трансформируется на конце поверхности в концевой конический вихрь.

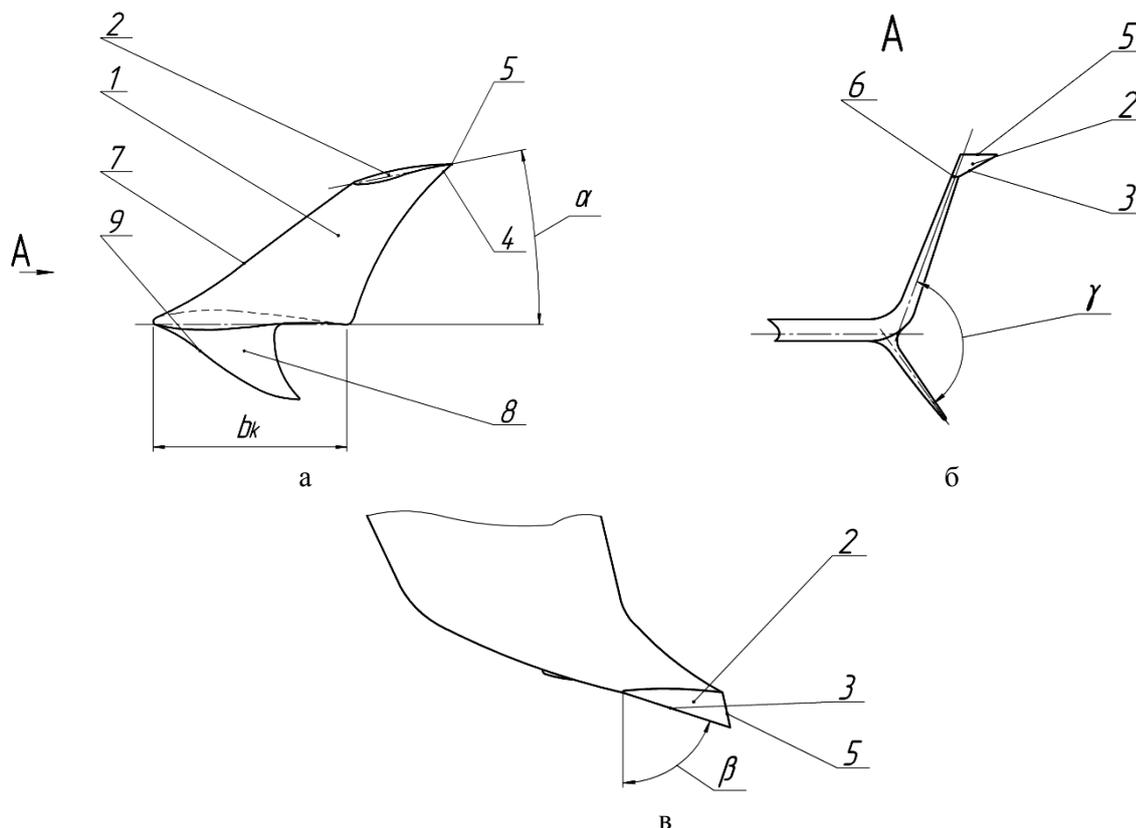


Рисунок 7 – Дополнительная аэродинамическая поверхность, патент № 2481242:  
а – вид слева; б – вид спереди; в – вид сверху

Представленная выше дополнительная аэродинамическая поверхность крыла повышает аэродинамическую эффективность ВС и позволяет обеспечить максимальный эффект от процесса перетекания потока воздуха во всей области эффективных значений [1]. Это позволяет: увеличить эффективный размах крыла, снижая индуктивное сопротивление, создаваемое срывающимся с конца стреловидного крыла вихрем и, как следствие, увеличивая подъемную силу на конце крыла; увеличить эффективное удлинение крыла, почти не изменяя при этом его размах; позволяет улучшить топливную экономичность у воздушного судна и дальность полёта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрокосмическое обозрение: аналитика, комментарии, обзоры / ООО «Издательская группа «Бедретдинов и Ко». – М.: Издательская группа «Бедретдинов и Ко», 2008. – № 5. – С. 54 – 57.
2. Павловский, Ю.Н. Имитационные модели и системы / Ю.Н. Павловский. – М.: ФАЗИС: ВЦ РАН, 2000. – 134 с.

3. Патент 2481242 РФ, МПК В64С 3/10. Законцовка крыла летательного аппарата / А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев (РФ). – №2011148436. – Заявл. 28.11.2011. – Оpubл. 10.05.2013. Бюл. № 13. – 4 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616240 РФ. Программа для исследования и расчета аэродинамических характеристик ЛА / А. В. Гордиенко, А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев; заявитель и патентообладатель Гос. образоват. учреждение Оренбург гос. ун-т. – № 2013616240 ; заявл. 14.05.2013 ; зарегистр. 02.07.2013. – 1 с.
5. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 268 с.
6. CFD Analysis – Guidance for Good Practice [Электронный ресурс] / NAFEMS Ltd. – 2013. – Режим доступа: <http://www.nafems.org/about/>.
7. 3D EXPERIENCE для аэрокосмической и оборонной отрасли [Электронный ресурс] / Dassault Systemes. – 2012–2013. – Режим доступа: <http://www.3ds.com/ru/solutions/aerospace-defense/>.

**Горбунов Александр Алексеевич**

ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург  
К.т.н., преподаватель кафедры летательных аппаратов  
Аэрокосмического института  
тел: 89225461343  
E-mail: Gorbynovaleks@mail.ru

**Припадчев Алексей Дмитриевич**

ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург  
Д.т.н., заведующий кафедрой летательных аппаратов  
Аэрокосмического института  
тел: 89033671960  
E-mail: aleksejj-pripadchev@rambler.ru

A.A. GORBUNOV, A.D. PRIPADCHEV

## SIMULATION ADDITIONAL AIRFOIL WING AIRCRAFT

*Simulation modeling to additional aerodynamic surfaces for main aircraft present in the article. Result of applying simulation modeling for additional aerodynamic wing surfaces is experimental data, by which one can follow the behavior of the model with the change of time, determine the required parameters for the given structural– geometric and aerodynamic characteristics, as well as to explore the properties of the model with a fixed geometry.*

**Keywords:** *additional aerodynamic surfaces; main aircraft; computer aided design; simulation modeling.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Аэрокосмическое обозрение: аналитика, комментарии, обзоры / ООО «Издательская группа «Бедретдинов и Ко». – М.: Издательская группа «Бедретдинов и Ко», 2008. – № 5. – С. 54 – 57.
2. Pavlovskij, Ju.N. Imitacionnye modeli i sistemy / Ju.N. Pavlovskij. – М.: FAZIS: VC RAN, 2000. – 134 с.
3. Патент 2481242 РФ, МПК В64С 3/10. Законцовка крыла летательного аппарата / А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев (РФ). – №2011148436. – Заявл. 28.11.2011. – Оpubл. 10.05.2013. Бюл. № 13. – 4 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616240 РФ. Программа для исследования и расчета аэродинамических характеристик ЛА / А. В. Гордиенко, А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев; заявитель и патентообладатель Гос. образоват. учреждение Оренбург гос. ун-т. – № 2013616240 ; заявл. 14.05.2013 ; зарегистр. 02.07.2013. – 1 с.
5. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 268 с.
6. CFD Analysis – Guidance for Good Practice [Электронный ресурс] / NAFEMS Ltd. – 2013. – Режим доступа: <http://www.nafems.org/about/>.
7. 3D EXPERIENCE для аэрокосмической и оборонной отрасли [Электронный ресурс] / Dassault Systemes. – 2012–2013. – Режим доступа: <http://www.3ds.com/ru/solutions/aerospace-defense/>.

**Alexander Gorbunov**

FGBOU VPO Orenburg State University, Orenburg  
Ph.D., teachers in the departmentry Aerospace aircraft of the institute  
tel: 89225461343  
E-mail: Gorbynovaleks@mail.ru

**Alexey Pripadchev**

FGBOU VPO Orenburg State University, Orenburg  
Doctor of technical sciences, head of the Institute of Aerospace aircraft  
tel: 89033671960  
E-mail: aleksejj-pripadchev@rambler.ru

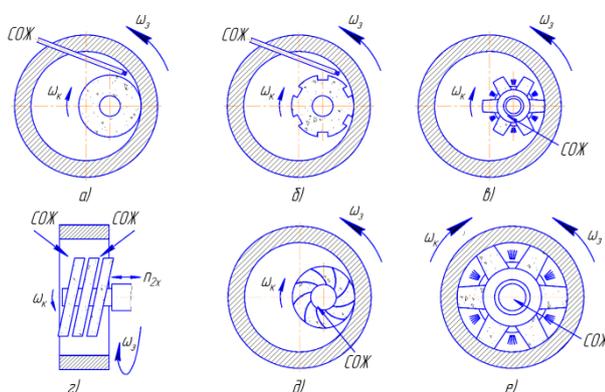
## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

*Рассмотрены схемы шлифования внутренних поверхностей подшипников качения и гидроцилиндров. Предложен алгоритм моделирования зоны резания единичного зерна сборным шлифовальным инструментом. Разработана компьютерная модель зоны резания в программе Deform 3D, проведен анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки и определены геометрические показатели качества поверхностного слоя заготовки*

**Ключевые слова:** Deform 3D, моделирование, зона резания, единичное зерно, внутренне шлифование.

Процесс шлифования является одним из прогрессивных способов формирования внутренних поверхностей ответственных деталей подшипников качения и внутренних поверхностей гильз гидроцилиндров, обеспечивающий высокую производительность и качество обрабатываемой поверхности. Однако дальнейшее повышение производительности в настоящее время существенно ограничено механическими свойствами шлифовального материала. Разработка и внедрение на производство новых шлифовальных материалов процесс дорогостоящий и продолжительный во времени, поэтому большинство исследований направлено на модернизацию или разработку новых схем обработки позволяющие существенно повысить не только производительность но и качество обрабатываемой поверхности.

Для определения рациональной схемы проведем анализ возможных схем внутреннего шлифования [1–8]. Несмотря на большое количество работ посвященных внутреннему шлифованию, большинство рассматривают классическую схему шлифования сплошным кругом (рисунок 1, а) или сравнивают одну две схеме шлифования с классической схемой. В соответствии с данными [1] максимальная скорость круга работающего по схеме (рисунок 1, а) не превышает 30–50 м/с.

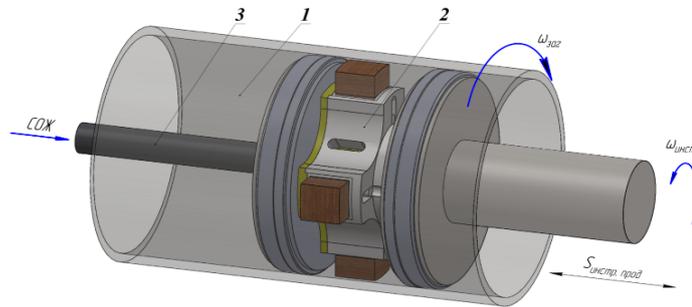


**Рисунок 1 – Схемы шлифования отверстий:**

- а) стандартным сплошным кругом; б) сплошным кругом с прерывистой режущей поверхностью;
- в) сборным кругом с металлическим корпусом и каналами для подвода СОЖ через инструмент;
- г) инструментом с аксиально-смещенным режущим слоем; д) цельнопрессованным инструментом с внутренними каналами для СОЖ; е) инструмент с радиально-подвижными сегментами.

Дальнейшее повышение скорости может привести к разрушению инструмента или образованию тепловых дефектов на обрабатываемой поверхности. Прерывистое шлифование (рис. 1, б–г) позволяет повысить скорость резания за счет снижения теплообразования в зоне обработки, однако, прерывистость процесса шлифования может привести к снижению параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. Подача СОЖ через внутренние каналы инструмента (рис. 1, д) или поры существенно усложняет технологию изготовления инструмента, а также требует дополнительной очистки СОЖ при работе. Шлифование инструментом с радиально-подвижными сегментами (рис. 1, е) и обеспечивающим высокое (до 1 МПа) давление СОЖ в зоне обработки, позволяет получить высокую производительность и минимизировать возможность возникновения дефектов на обрабатываемой поверхности заготовки, при этом увеличивается вспомогательное время на установку боковых крышек, а также возникают сложности при обработке глубоких отверстий.

Представленная схема обработки сборным инструментом с радиально подвижными сегментами и установленными по торцам инструмента уплотнительными манжетами (рисунок 2) позволяет обеспечить высокую производительность исключив недостатки схемы (рисунок 1, е). Разработанная гидродинамическая модель [9, 10] доказывает образование и удержание в зоне обработки высокого давления СОЖ, результаты моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями.



**Рисунок 2 – Схема шлифования отверстия соосным инструментом с радиально-подвижными абразивными брусками:**

*1 – заготовка; 2 – сборный шлифовальный инструмент; 3 – трубопровод для подвода СОЖ*

В последние годы все чаще применяется компьютерное моделирование процессов механической обработки. Разработанные алгоритмы и методы решения задач прикладной механики позволяют учитывать множество конструкционных и технологических факторов, а также оценивать напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя заготовки и рабочей поверхности инструмента и много другое. Моделирование процессов непосредственно в зоне резания позволяет оценить возможности инструмента, определять режимы обработки и оценивать качество обработанной поверхности заготовки. Исследования напряжений, тепловых полей, фазовых превращений, структуры и получение модели поверхностного слоя после обработки возможно с помощью программ реализующих метод конечных элементов. В настоящий момент существует несколько программных продуктов позволяющих решать подобные задачи, среди них можно выделить Ansys, SolidWorks Simulation, Abaqus, Deform 3D и др. для решения данной задачи выбираем программу Deform 3D.

Рассмотрим алгоритм моделирования зоны резания единичного шлифовального зерна сборным шлифовальным инструментом работающим по схеме (рис. 2).

1. Выбор и назначение шлифовального материала. Для заданных условий обработки, необходимой точности и качество обрабатываемой поверхности в соответствии с рекомендациями [11] выбираем характеристики шлифовального материала.

2. Выбор и определение геометрических параметров шлифовального зерна. В соответствии с рекомендациями [12] определяем форму и геометрические размеры шлифовального зерна основной фракции, т.к. более 75% всех шлифовальных зерен инструмента принадлежит данной фракции.

3. Построение объемной модели зоны резания. Используя встроенный в программу Deform 3D модуль геометрического моделирования или используя другую САД программу создаем геометрическую модель зоны резания (шлифовальное зерно и заготовка), с целью сокращения машинного времени создаем только часть заготовки участвующей в процессе резания в заданный период времени.

4. Параметры расчета и создание сетки. Задаем в программе Deform 3D начальные условия а также параметры расчета, такие как свойства материала заготовки и зерна, скорости перемещений, взаимодействия объектов между собой и с окружающей средой, параметры сетки.

5. Расчет. При выполнении расчета программа позволяет использовать только все ресурсы компьютера, но и запустить параллельное вычисление одновременно на нескольких компьютерах, что существенно сокращает время расчета. Просмотр предварительных результатов моделирования при расчете позволяет оценить их адекватность и внести при необходимости изменения.

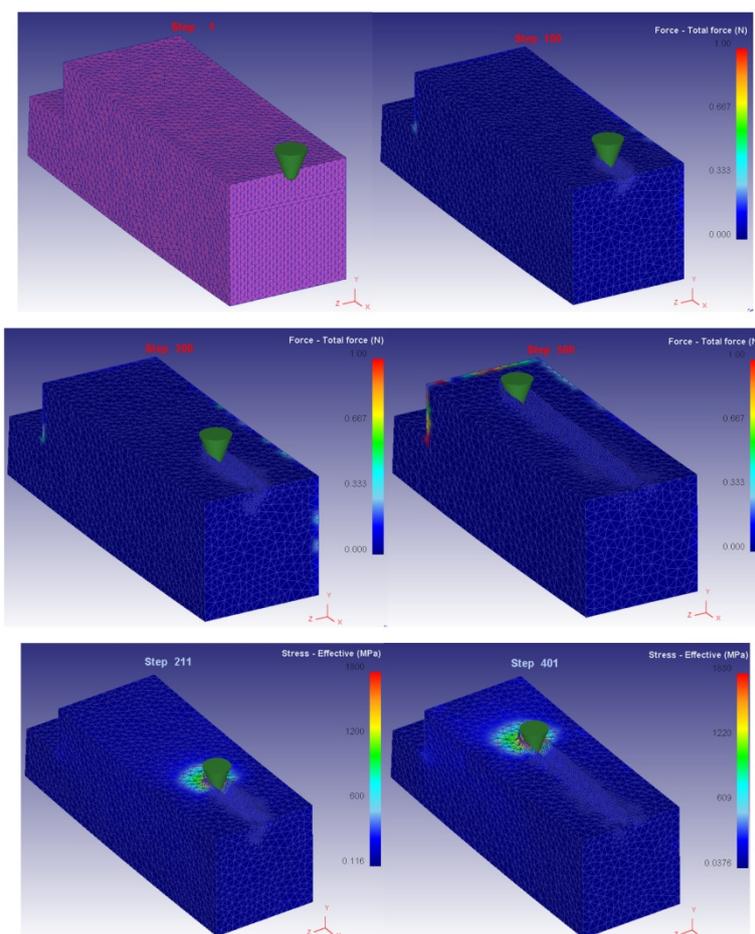


Рисунок 3 – Результаты компьютерного моделирования в программе Deform 3D

7. Просмотр результатов. Результаты моделирования отображаются на экране монитора в виде разноцветных 3D моделей и графиков.

Результаты компьютерного моделирования процесса шлифования внутреннего кольца подшипника качения инструментом (рис. 3) в программе Deform 3D представлены на рисунке 3. Исследование проводилось при следующих режимах обработки: материал заготовки – сталь ШХ15, материал шлифовального зерна электрокорунд, окружная скорость вращения инструмента 45 м/с, расход СОЖ 0,02 м<sup>3</sup>/мин.

Анализ геометрических параметров полученного поверхностного слоя заготовки удобнее проводить в любой другой САД–программе, например в SolidWorks. Результаты моделирования показали о формировании на обрабатываемой поверхности заготовки шероховатости Ra=0,14–0,2 мкм. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают результаты моделирования.

Таким образом, использование программы Deform позволяет в короткие сроки провести моделирование процесса резания и на основе анализа полученных результатов скорректировать параметры технологического процесса для обеспечения заданного качества поверхностного слоя заготовки при оптимальных режимах обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов [Справочник] /Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев.: Вища школа, 1986. – 252 с.
3. Попов, С. А. Шлифование высокопористыми кругами / С.А. Попов, Р.В. Ананьян. – М.: Машиностроение, 1980. – 79 с.
4. Ящерицын, П. И. Шлифование с подачей СОЖ через поры круга / П. И. Ящерицын, И. П. Караим. – Минск: Наука и техника, 1974. – 256 с.
5. Пат. 2182531 Российская Федерация, МПК В24В. Способ внутреннего шлифования / Д.Р. Блурцян, В.Г. Гусев, Ю.В. Трифонова и др.; заявитель и патентообладатель Блурцян Д.Р.; заявл. 19.01.00; опубл. 20.05.02. – 4 с.

6. Кобяков, Е.Т. Кинематика процесса шлифования наклонными кругами / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, М.Г. Подзолков //Справочник. Инженерный журнал. – 2003. № 6. – С. 60-64.
7. Афанасьев, Б.И. Абразивная обработка отверстий / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев.- М.: Машиностроение-1, 2003. – 120 с.
8. Гусев, В.Г. Дискретное внутреннее шлифование /Ю.С. Степанов, В.Г. Гусев, Б.И. Афанасьев / Под общей ред.Ю.С. Степанова.- М.: Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
9. Гусев, В.Г. Моделирование давления смазочно–охлаждающей жидкости при шлифовании инструментом с радиально–подвижными абразивными сегментами / В.Г. Гусев, С.Б. Андрианов // СТИН. 2012. №2. – С. 29–33.
10. Гусев, В.Г. Течение смазочно–охлаждающей жидкости через торцовые уплотнения соосного шлифовального инструмента / В.Г. Гусев, С.Б. Андрианов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2012. – №4. – С. 32–35.
11. Справочник технолога–машиностроителя: в 2–х т., Т.2. / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
12. Грабченко, А.И. 3D моделирование алмазно–абразивных инструментов и процессов шлифования / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2006. – 364 с.

**Андрианов Сергей Борисович**  
Муромского института (филиал) ВлГУ, г. Муром  
Ст. преподаватель каф. АПМиТП  
E-mail: andrianov\_s@rambler.ru

**Долгов Вадим Борисович**  
Муромского института (филиал) ВлГУ, г. Муром  
Студент  
E-mail: andrianov\_s@rambler.ru

S.B. ANDRIANOV, V.B. DOLGOV

## MODELING CUTTING ZONE AT INTERNAL GRINDING

*The schemes of grinding internal surfaces of rolling bearings and hydro cylinders are considered. The algorithm of modelling the cutting zone of the singular grain by the grinding tool. The computer model of the cutting zone in the program Deform 3D has been worked out, the analysis of the stress– strain state of the surface layer of the workpiece is conducted and the geometrical parameters of the quality of the surface layer of the workpiece have been determined.*

**Keywords:** Deform 3D, modelling, cutting zone, singular grain, internal grinding.

## BIBLIOGRAPHY

1. Абразивная и алмазная обработка материалов [Справочник] /Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Якимов, А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов. – Киев.: Вища школа, 1986. – 252 с.
3. Попов, С. А. Шлифование высокопористыми кругами / С.А. Попов, Р.В. Ананьян. – М.: Машиностроение, 1980. – 79 с.
4. Ящерицын, П. И. Шлифование с подачей СОЖ через поры круга / П. И. Ящерицын, И. П. Караим. – Минск: Наука и техника, 1974. – 256 с.
5. Пат. 2182531 РФ, МПК В24В. Способ внутреннего шлифования / Д.Р. Блурцян, В.Г. Гусев, Ю.В. Трифонова и др.; заявитель и патентообладатель Блурцян Д.Р.; заявл. 19.01.00; опубл. 20.05.02. – 4 с.
6. Кобяков, Е.Т. Кинематика процесса шлифования наклонными кругами / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, М.Г. Подзолков //Справочник. Инженерный журнал. – 2003. № 6. – С. 60-64.
7. Афанасьев, Б.И. Абразивная обработка отверстий / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев.- М.: Машиностроение-1, 2003. – 120 с.
8. Гусев, В.Г. Дискретное внутреннее шлифование /Ю.С. Степанов, В.Г. Гусев, Б.И. Афанасьев / Под общей ред.Ю.С. Степанова.- М.: Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
9. Гусев, В.Г. Моделирование давления смазочно–охлаждающей жидкости при шлифовании инструментом с радиально–подвижными абразивными сегментами / В.Г. Гусев, С.Б. Андрианов // СТИН. 2012. №2. – С. 29–33.
10. Гусев, В.Г. Течение смазочно–охлаждающей жидкости через торцовые уплотнения соосного шлифовального инструмента / В.Г. Гусев, С.Б. Андрианов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2012. – №4. – С. 32–35.
11. Справочник технолога–машиностроителя: в 2–х т., Т.2. / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
12. Грабченко, А.И. 3D моделирование алмазно–абразивных инструментов и процессов шлифования / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2006. – 364 с.

**Sergey Andrianov**  
Murom Institute (branch) of VSU, Murom  
St. Lecturer Department. АРМиТР  
E-mail: andrianov\_s@rambler.ru

**Vadim Dolgov**  
Murom Institute (branch) of VSU, Murom  
student  
E-mail: andrianov\_s@rambler.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПЕРМАНЕНТНО ЗАКРУЧЕННОГО ВНУТРИ КРУГЛОЙ ТРУБЫ ПОТОКА

*В результате исследования были получены решения для интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении теплоносителей в вышеуказанных каналах, более общие, чем существующие. Полученные в данном исследовании решения верифицированы существующим и оригинальным экспериментальным материалом. Существующие решения являются частным случаем новых решений. Полученные экспериментальные данные отличаются оригинальностью. Реализованная теория позволяет точнее прогнозировать уровень интенсификации теплообмена, чем имеющаяся; теорию необходимо использовать при доводке существующих и разработке перспективных теплообменных аппаратов и устройств. Применение разработанных расчётных методов интенсифицированного теплообмена позволит снизить металлоёмкость и габариты, а также температуру стенок перспективных теплообменных аппаратов с интенсифицированным теплообменом.*

**Ключевые слова:** *закрученный поток; скрученная лента; теплообмен; интенсификация; математическое моделирование; эксперимент; турбулентное.*

Во многих областях техники широко применяются различного рода трубчатые теплообменные аппараты и теплообменные устройства, в которых, в результате интенсификации теплообмена, может быть достигнуто снижение их массогабаритных показателей при заданных значениях теплового потока, гидравлических потерь, расходов и температур теплоносителей. В рамках данного исследования под интенсификацией теплообмена понимаются применение закрутки потока при установке ленточного закручивателя в прямых круглых трубах [1–3]. Данный метод отличается технологичностью. Возможна комбинированная интенсификация теплообмена: вставка скрученной ленты в трубу с накаткой [4]; к недостаткам последней следует отнести слишком высокий опережающий рост гидравлического сопротивления канала по сравнению с ростом теплообмена. К недостаткам метода закрутки всего потока по сравнению с применением дискретных, поверхностно расположенных турбулизаторов потока, исследование которых наиболее полно представлено в [5] – с экспериментальной, а в [6] – с теоретической точек зрения соответственно, является то, что турбулизации подвергается полностью весь поток, в то время как при использовании турбулизаторов – только пристенный слой, что обеспечивает более выгодное соотношение роста теплообмена по сравнению с ростом гидросопротивления. Основное преимущество закрутки потока скрученной ленты по сравнению со шнеком заключается в том, что лента не перегораживает трубу полностью, как шнек, поэтому она закручивает весь поток: от оси до стенки. Кроме того, вставки типа шнек требуют гораздо большего количества металла и обладают повышенной опасностью заноса и загрязнения [1]. Постоянная закрутка потока обеспечивает постоянство при фиксированном угле закрутки:

$$(\psi = \arctg(w_0/w_x)), \quad (1)$$

где  $w_0, w_x$  – тангенциальная и осевая составляющие скорости закрученного потока соответственно).

Степень интенсификации теплообмена зависит как от конструктивных параметров закручивающих устройств, так и от гидродинамических и тепловых условий процесса теплообмена. Применение ленточных закручивателей потока с постоянной закруткой в прямых круглых трубах позволяет довольно существенное – до (20÷30)% – повысить теплосъём при равных потерях на гидросопротивление [1–2]. Экспериментальные данные по теплообмену справедливы только для определённого вида течений и типоразмеров скрученной ленты, на которых были проведены эти исследования, а расчётные методы исследования интенсифи-

кации теплообмена при турбулентном течении в трубах разработаны ещё недостаточно, на что указывается, например в [1–4], они опираются на упрощённые модели сложных физических явлений, принимаемые при этом допущения приводят к значительному расхождению с опытными данными.

В связи вышеизложенным, необходима разработка новых, более точных, чем существующие, теоретических методов исследования интенсификации теплообмена при применении ленточных закручивателей потока.

Математическое моделирование теплообмена в круглых трубах с ленточными закручивателями следует начать с детерминирования средних скоростей на внешней границе турбулентного пограничного слоя трубы и в канале, ограниченном стенкой трубы и поверхностью скрученной ленты, поскольку они будут существенным образом отличаться от аналогичных параметров в круглой трубе без ленты. Существующие экспериментальные данные показывают, что в круглых трубах с ленточными завихрителями (а также в кольцевых каналах со шнековыми завихрителями) поле скоростей в ядре потока имеет спиральный характер и соответствует т.н. вынужденному вихрю (квazitвёрдое вращение со скоростью:

$$w_{\theta} = 2\pi R \overline{w_x} / H, \quad (2)$$

где  $H$  – полный шаг ленточного закручивателя,  
 $R$  – текущий радиус круглой трубы,  
 $\overline{w_x}$  – средняя осевая скорость), наложенному на практически равномерное осевое течение.

У стенки скорость на внешней границе тангенциального гидродинамического пограничного слоя будет равна  $w_{\theta}^{\max} = 2\pi R_0 \overline{w_x} / H$  ( $R_0$  – радиус круглой трубы). Детерминирование потерь на трение производится из допущения, что диссипация энергии происходит преимущественно только у стенки, а в ядре потока, в связи с квazitвёрдым вращением, диссипация энергии настолько мала, что ею можно пренебречь. Энергия генерации вынужденного вихревого движения может быть определена независимым образом.

На внешней границе пограничного слоя результирующая скорость будет равна:

$$w_0 = \sqrt{(w_{\theta}^{\max})^2 + (\overline{w_x})^2} = \overline{w_x} \sqrt{1 + 4\pi^2 (R_0/H)^2}. \quad (3)$$

А на внешней границе пограничного слоя на скрученной ленте результирующая скорость составит:

$$w_1 = \frac{1}{R_0} \int_0^{R_0} \overline{w_x} \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} dR = \overline{w_x} \pi \frac{R_0}{H} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2} + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2 \ln \left( 2\pi \frac{R_0}{H} + \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} \right) \right]. \quad (4)$$

Осреднённая скорость на внешней границе пограничного слоя в канале, ограниченном внутренней стенкой трубы и поверхностью скрученной ленты, детерминируется в соответствии с долями вышеуказанных поверхностей:

$$w_1 = \frac{1}{R_0} \int_0^{R_0} \overline{w_x} \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} dR = \overline{w_x} \pi \frac{R_0}{H} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2} + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2 \ln \left( 2\pi \frac{R_0}{H} + \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} \right) \right]. \quad (5)$$

Экспериментальные данные [1–2] показывают, что осевое поле скоростей в ядре потока практически равномерно, поэтому вполне справедливым будет допущение  $w_0^{\max} = \overline{w_x}$ . В данном случае рассматривается постоянная закрутка потока по всей длине трубы, поэтому можно его принять как развитое стабилизированное течение. Анализ существующих многочисленных экспериментальных данных, приведённых в [1–3], позволяет постулировать эквивалентность профилей полных обобщённых скоростей для закрученных и незакрученных по-

токов. Этот результирующий профиль скорости пограничного слоя, на внешней границе которого скорость выражается формулой (5), так же, как и при обычном турбулентном течении в круглых прямых трубах, будет логарифмическим или степенным, т.к. характеристики вышеупомянутого профиля выражаются теми же факторами, а разница между толщинами осевого и тангенциального пограничных слоёв пренебрежимо мала. Следовательно, можно считать, что сопротивление трению в закрученном потоке эквивалентно сопротивлению трению в прямолинейном потоке, если в качестве характерной скорости принять среднюю полную скорость закрученного потока (5), а среднюю длину эквивалентного канала детерминировать как спрямлённую длину по средней линии тока на внешней границе пограничного слоя. Линии тока вышеуказанного результирующего движения имеют спиральный характер, а средняя их длина  $L$  может быть детерминирована следующим образом:

$$\bar{w} = \frac{\pi}{1 + \frac{\pi}{2}} \bar{w}_x \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} + \frac{R_0}{H} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2} + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2 \ln \left( 2\pi \frac{R_0}{H} + \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

или

$$L = z \cdot l, \quad (7)$$

где  $l$  – длина трубы.

Иными словами, в этих условиях такому спиральному движению с точки зрения детерминирования гидравлического сопротивления эквивалентно обычное турбулентное движение в круглой прямой трубе при средней скорости, определяемой выражением (5), при предположении  $\bar{w}_x = w_0^{\max}$ , при длине трубы  $L$  и характерном размере  $D_{\text{Э}}$  – эквивалентном диаметре канала. Сопротивление трению такого течения детерминируется следующим выражением ( $\rho$  – плотность теплоносителя):

$$\xi_{\text{ТР}} \frac{l}{D_{\text{Э}}} \frac{\rho \bar{w}_x}{2} = 0,184 \text{Re}^{-0,2} z^{-0,2} \frac{\rho \bar{w}_x}{2} z^2 \frac{l}{D_{\text{Э}}} z, \quad (8)$$

или

$$\xi_{\text{ТР}} = 0,184 \text{Re}^{-0,2} z^{2,8} = 0,184 \text{Re}^{-0,2} \left\{ \frac{\pi}{1 + \frac{\pi}{2}} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} + \frac{R_0}{H} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2} + \frac{1}{4\pi^2} \left(\frac{H}{R_0}\right)^2 \ln \left( 2\pi \frac{R_0}{H} + \sqrt{1 + 4\pi^2 \left(\frac{R_0}{H}\right)^2} \right) \right] \right] \right\}^{2,8}. \quad (9)$$

Коэффициент сопротивления вихревого смешения  $\xi_{\text{ВС}}$  детерминируется из условия обмена осевым количеством движения между ядром потока и пограничным слоем по периметру трубы. Вышеуказанное вихревое смешение связано с вторичными течениями и наличием дополнительной довольно сложной системой вихрей [1–3], вызванными взаимодействием закрученного потока с закрученной лентой, что вызывает дополнительное смешение теплоносителя пограничного слоя с ядром потока, дополнительную турбулизацию и приводит к увеличению гидравлического сопротивления.

Теплоноситель из осевого пограничного слоя, обладающей невысокой скоростью, вносится в ядро потока, вызывая его торможение, что эквивалентно обмену осевым количеством движения. Запишем уравнение баланса импульсов:

$$\Delta p_{\text{ВС}} \frac{\pi D^2}{4} = 2 \int_0^{R_0} (w_x^{\max} - w_x) \frac{dM}{g}, \quad (10)$$

где  $M = \rho w_0 LR$  – массовый расход тангенциальной составляющей скорости для половины трубы;

$g$  – ускорение свободного падения.

После соответствующих подстановок профилей тангенциальной составляющей для всех подслоёв, получим [2]:

$$\xi_{BC} = \frac{0,199}{Re} \left( \frac{D}{H} \right) \left( 1125 \cdot \ln \frac{Re \sqrt{\xi}}{2} - 3170 \right), \quad (11)$$

где  $\xi = \xi_{TP} + \xi_{BC}$  – коэффициент гидравлического сопротивления в канале.

Таким образом, коэффициент гидравлического сопротивления в канале  $\xi$  детерминируется из решения следующего нелинейного уравнения:

$$\begin{aligned} \xi = & \frac{0,199}{Re} \left( \frac{D}{H} \right) \left( 1125 \cdot \ln \frac{Re \sqrt{\xi}}{2} - 3170 \right) + 0,184 Re^{-0,2} \left\langle \pi / \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right) \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4\pi^2 \left( \frac{R_0}{H} \right)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{R_0}{H} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{H}{R_0} \right)^2} + \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{H}{R_0} \right)^2 \ln \left( 2\pi \frac{R_0}{H} + \sqrt{1 + 4\pi^2 \left( \frac{R_0}{H} \right)^2} \right) \right] \right\} \right\rangle^{2,8}. \quad (12) \end{aligned}$$

Сравнение расчётных значений коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  в канале со скрученной лентой с экспериментальными данными при классических граничных условиях для воздуха и воды [1–2] показало, что теория хорошо коррелирует с имеющимися экспериментальными данными по гидравлическому сопротивлению в трубах с ленточными закручивателями в широком диапазоне чисел Рейнольдса и относительных шагов скрученной ленты  $H/D$  при разных числах Прандтля. Для расчёта полного коэффициента гидравлических потерь следует учесть потери на начальное создание вынужденного вихревого течения (создание вихря), которые детерминируются, исходя из условия, что вся кинетическая энергия вращательного движения представляет собой потери. При равномерной по сечению плотности теплоносителя можно записать:

$$\frac{\Delta p_{CB}}{\rho} = \frac{4}{\pi D^2 \rho dx} 2 \int_0^{R_0} \frac{\pi R dR dx \rho w_0^2}{g}. \quad (13)$$

Коэффициент сопротивления на начальное создание вынужденного вихревого течения детерминируется из использованного условия вынужденного вихревого течения  $w_0$  и определения для средней осевой скорости  $\bar{w}_x$ :

$$\xi_{CB} = \left( \frac{D_{\text{э}}}{l} \right) \left( \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{H} \right)^2 \right). \quad (14)$$

Коэффициент полного гидравлического сопротивления в трубе с ленточным закручивателем будет равен сумме коэффициентов сопротивления трения, сопротивления вихревого смешения и сопротивления генерации начального вынужденного вихревого течения:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{TP} + \xi_{BC} + \xi_{CB}. \quad (15)$$

Сравнение расчётных значений коэффициента полного гидравлического сопротивления  $\xi_{\Sigma}$  в канале со скрученной лентой с экспериментальными данными при классических граничных условиях для воздуха [1] показало, что теория очень хорошо коррелирует с имеющимися экспериментальными данными по полному гидравлическому сопротивлению в трубах с ленточными закручивателями в широком диапазоне определяющих параметров.

Следовательно, теоретические данные, полученные в рамках данной работы, достаточно хорошо коррелируют с имеющимися экспериментальными данными по гидравлическому сопротивлению в каналах с ленточными закручивателями потока при классических граничных условиях для довольно широкого диапазона определяющих параметров, перекрывающий существующий экспериментальный [1–2]. Данный теоретический подход к исследованию гидравлического сопротивления в трубах со скрученной лентой при классических граничных условиях в дальнейшем применим к исследованию гидросопротивления для условий однофазного закрученного потока при одностороннем нагреве [3, 8]. Анализ пока-

зал, что соответствие между теоретическими и экспериментальными данными хорошее.

Таким образом, представленные теоретические данные в достаточной степени хорошо коррелируют с имеющимся экспериментальным материалом по гидравлическому сопротивлению в каналах с ленточными закручивателями потока при турбулентном течении как при классических граничных условиях [1–2], так и для условий однофазного закрученного потока при одностороннем нагреве [3, 8] для достаточно широкого диапазона определяющих параметров, перекрывающий имеющийся экспериментальный диапазон.

Рассмотренные при моделировании гидравлического сопротивления при турбулентном течении в трубах с ленточными закручивателями потока эффекты указывают на то, что турбулизация закрученного потока наступает раньше (при более низких числах Рейнольда), чем при обычном турбулентном течении, т.к. при данной среднерасходной скорости эффективная скорость больше и имеет место процесс вихревого смешения. Вышесказанное существенно интенсифицирует теплообмен за счёт более ранней турбулизации потока (потеря устойчивости наступает ранее). Подобные эффекты наблюдаются и при применении труб с дискретными турбулизаторами потока [5–7]. Суммарный теплоперенос в данном случае осуществляется за счёт соответствующих эффектов течения в пограничном слое на стенке трубы, обмена энергией, вызываемого вихревым смешением. Главная роль в вихревом смешении обуславливается вязким и буферным подслоями, а дефект энергии в области ядра потока незначителен, поэтому конвективный тепловой поток из пограничного слоя в ядро потока за счёт вихревого смешения для каждой половины трубы примет вид:

$$dQ_{BC} = \rho c_p d\dot{m}(T - T_{max}), \quad (16)$$

где  $d\dot{m} = \rho w_\theta dx dR$ . Т.к.  $dy = -dR$  и  $w_\theta = 2\pi R \bar{w}_x / H$ .

Получим для всей трубы:

$$dq_{BC} = \frac{dQ_{BC}}{\pi R_0 dz} = \frac{\rho c_p dm(T - T_{maz})}{\pi R_0 dz} = 2\rho c_p \bar{w}_x \left( T_w - T_{max} - \Delta \bar{T} \frac{q}{\rho c_p w_*} \right) y dR / (\delta H), \quad (17)$$

где  $T_{max}$  и  $T_w$  – максимальная температура в канале и температура стенки соответственно;  $\delta$  – толщина теплового пограничного слоя.

Таким образом,

$$q_{BC} = \int_{\eta=0}^{\eta=30} dq_{BC} = \rho c_p \bar{w}_x (T_w - T_{maz}) \frac{\delta}{H} - \frac{2\bar{w}_x q_w}{\delta H w_*^3} \int_{\eta=0}^{\eta=30} \Delta \bar{T} \eta d\eta, \quad (18)$$

где  $\eta = y w_* / \nu$  – безразмерная координата.

После подстановки выражения для скорости трения ( $w_* = \bar{w}_x \sqrt{\xi/8}$ ) и т.к. значение  $\delta$  на внешней границе переходной области равно 30, получим:

$$q_{BC} = 30\sqrt{2}\rho c_p \nu (T_w - T_{max}) / (H\sqrt{\xi/4}) - q_w \nu / (7,5\bar{w}_x H(\xi/4)) \int_0^{30} \Delta \bar{T} \eta d\eta. \quad (19)$$

Расчёт интеграла в правой части выражения (17) проводится с учётом турбулентной теплопроводности в вязком подслое, как и в работах [1, 6], изменяющейся по закону "четвёртой степени". Для температурного напора в пограничном слое будем иметь следующие соотношения:

$$\Delta \bar{T} \Big|_{\eta=0}^{\eta=5} = \text{Pr} \int_0^{\eta} \frac{d\eta}{1 + \frac{\beta}{\eta_1^3} \eta^4}; \quad (20)$$

$$\Delta \bar{T} \Big|_{\eta=5}^{\eta=30} = \text{Pr} \int_0^5 \frac{d\eta}{1 + \frac{\beta}{\eta_1^3} \eta^4} + 5 \text{Pr} \int_0^5 \frac{d\eta}{5 + \text{Pr} \eta - 5 \text{Pr}}, \quad (21)$$

где  $\beta=0,032$  и  $\eta_1 = 5$  – константы.

Интеграл в выражении (17) примет нижеприведённый вид, который решается в рам-

как данного исследования точным аналитическим образом, в отличие от предыдущих работ, в которых использовались приближённые зависимости [1, 2], что позволило повысить точность решения задачи о теплообмене при турбулентном течении в трубах с ленточными закручивателями:

$$\int_0^{30} \Delta \bar{T} \eta d\eta = \text{Pr} \int_0^5 \eta d\eta \int_0^{\eta} \frac{d\eta}{1 + \frac{\beta}{\eta_1^3} \eta^4} + 5 \text{Pr} \int_5^{30} \eta d\eta \int_0^{\eta} \frac{d\eta}{5 + \text{Pr} \eta - 5 \text{Pr}} + \text{Pr} \int_5^{30} \eta d\eta \int_0^5 \frac{d\eta}{1 + \frac{\beta}{\eta_1^3} \eta^4} =$$

$$= \frac{\text{Pr}}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} \left[ \frac{1}{2} \left( 225 + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} \right) \ln \left( \frac{25 + 5\sqrt{2} \sqrt[4]{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} + \sqrt{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}}}{25 - 5\sqrt{2} \sqrt[4]{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} + \sqrt{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}}} \right) + \left( 225 - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} \right) \times \right. \quad (22)$$

$$\left. \times \left( \arctg \left( 1 + 5\sqrt{2} / \sqrt[4]{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} \right) - \arctg \left( 1 - 5\sqrt{2} / \sqrt[4]{\frac{\eta_1^3}{\text{Pr}\beta}} \right) \right) \right] + \frac{125}{4} \frac{1}{\text{Pr}^2} [\ln(1 + 5 \text{Pr})(70 \text{Pr}^2 + 4 \text{Pr} - 2) - (45 \text{Pr} - 10) \text{Pr}].$$

Детерминирование теплового потока, связанного с трением, проводится аналогично потерям на трение на основе классических зависимостей для прямых круглых труб, а также по эффективной скорости. В работе [1] представлено доказательство, основанное на аналогии Рейнольдса, того, что теплообмен, связанный с трением, закрученного потока в трубе, детерминируется по зависимостям для прямолинейного движения осевой скорости на полную скорость. Эффективная скорость на внешней границе пограничного слоя в трубе и результирующая средняя скорость детерминируется вышеприведённым соотношением:  $w_0 = \overline{w_x} \sqrt{1 + 4\pi^2 (R_0/H)^2}$ . Оценка роли в теплообмене для закрученного потока внутри трубы осевых и тангенциальных в пристеночных течениях проводится на основе модифицированной аналогии Рейнольдса и аналогии Колбурна, аналогично работе [2].

Подытоживая, для суммарного теплового потока будем иметь:

$$q = (30\sqrt{2} \rho c_p v (T_w - T_{maz}) / (H \sqrt{\xi/4}) + \text{Nu}_{\text{TP}} \lambda (T_w - \bar{T}) / D_3) / \left( 1 + D_3 / (H \cdot 7,5 \text{Re}) \int_0^{30} \Delta \bar{T} \eta d\eta \right). \quad (23)$$

Значение  $\text{Nu}_{\text{TP}}$  в выражении (23) детерминируется, в соответствии с вышеприведённым анализом, по зависимостям для обычного турбулентного прямолинейного движения, где число Рейнольдса  $\text{Re}$  определяется по эффективной скорости.

Для детерминирования числа Нуссельта для турбулентного течения в трубах с ленточными закручивателями необходимо знать значение  $(T_w - T_{\text{max}}) / (T_w - \bar{T})$ , которое определяется, согласно методу, использованному в [6] при решении аналогичной задачи для труб с поверхностными дискретными турбулизаторами потока.

Согласно [6], запишем соответствующее выражение, которое используем для каждого из подслоёв:

$$\frac{T_w - T_{\text{max}}}{T_w - \bar{T}} = \int_0^1 \frac{r}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{\mu_T}{\mu}} dr / \int_0^1 \frac{r^3}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{\mu_T}{\mu}} dr, \quad (24)$$

где  $r = R/R_0$  – безразмерный (или относительный) радиус трубы;

$\text{Pr}_T/\text{Pr}$ ;  $\mu_T/\mu$  – отношения турбулентного числа Прандтля к молекулярному и турбулентной динамической вязкости к молекулярной соответственно.

В [6] показано, что значения  $(T_w - T_{\text{max}}) / (T_w - \bar{T})$  могут существенным образом отличаться от аналогичных значений для течения в круглых трубах, поскольку применение турбулизаторов в значительной степени изменяет стратификацию потока в зависимости от геометрических характеристик турбулизаторов и режимов течения теплоносителя.

В случае турбулентного течения в трубах с ленточными закручивателями потока стратификация так же будет изменена в зависимости от геометрических характеристик скру-

ченной ленты и режимов течения теплоносителя, поскольку зависимость коэффициента гидравлического сопротивления для этого случая существенно отличается от зависимости для круглых труб. Следует отметить, что и для труб с турбулизаторами вышеуказанная зависимость резко отличается от зависимости для круглых труб [6].

Полученные точные аналитические зависимости для  $(T_w - T_{\max}) / (T_w - \bar{T})$  для труб со вставленной скрученной лентой, расчёт по которым позволяют сделать вывод, что для труб со скрученной лентой вышеуказанное соотношение в довольно значительной степени отличается от соответствующего приближённого соотношения [1], особенно при снижении чисел Рейнольдса и Прандтля. Следовательно, при расчёте теплообмена при турбулентном течении в трубах со скрученной лентой следует применять точные аналитические решения, полученные в данной работе, поскольку применение приближённых соотношений для круглых труб [1] приводит к заметным погрешностям.

Применение вышеуказанных аналитических зависимостей позволяет существенно повысить точность детерминирования теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах со скрученной лентой; ранее подобные выводы были сделаны для труб с турбулизаторами в целой серии работ автора, ссылки на которые имеются в [6]. Окончательное выражение для числа Нуссельта при турбулентном течении в трубах с ленточными закручивателями потока запишем на основании [1]:

$$Nu = \frac{85 \frac{Pr}{\sqrt{\xi}} \left( \frac{D_3}{H} \right) \left[ \frac{T_w - T_{\max}}{T_w - \bar{T}} \right] + \frac{0,023 Pr Re^{0,8} \left( 1 + 4\pi^2 \left( \frac{R_0}{H} \right)^2 \right)^{0,4}}{1 + 2,14 Re^{-0,1} \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \left( 1 + 4\pi^2 \left( \frac{R_0}{H} \right)^2 \right)^{-0,05}}}{1 + \frac{4D_3}{7,5H Re \xi} \left[ \int_0^{30} \Delta \bar{T} \eta d\eta \right]} \quad (25)$$

На основании формулы (25) можно сделать вывод, что с увеличением числа Рейнольдса значение вихревого смешения в теплообмене в трубах со скрученной лентой снижается, что связано с общей турбулизацией потока. В работах [1, 2] оценивается влияние на теплообмен эффекта оребрения, создаваемого скрученной лентой. В подавляющем числе случаев закручиватели потока устанавливаются с достаточным зазором [1–4, 8], поэтому эффект оребрения крайне невелик и при исследовании, как правило, не учитывается [3, 8].

Анализ указывает на довольно хорошее соответствие теории с существующим экспериментом для труб с ленточными закручивателями в широком диапазоне определяющих параметров. Таким образом, теоретические данные по теплообмену в трубах со скрученной лентой, полученные в рамках данной работы, достаточно хорошо коррелируют с имеющимся экспериментальным материалом при классических граничных условиях для широких диапазонов геометрических характеристик ленточного закручивателя потока и режимов течения теплоносителя, которые в значительной мере превосходят существующие экспериментальные [1–2]. Очень важным представляется вопрос о влиянии числа Прандтля на теплообмен при турбулентном течении в трубах со скрученной лентой.

Анализ полученных расчётных значений теплообмена при турбулентном течении в трубах с ленточными закручивателями потока показывает, что погрешность решения по приближённой методике [2] по отношению к уточнённой, полученной в данной работе, составляет от +5% до –15%, что указывает на неоспоримое преимущество последнего, поэтому её необходимо использовать, несмотря на более высокую сложность по сравнению с существующими методиками расчёта. Теория, разработанная в данном исследовании, позволяет детерминировать теплообмен в закрученном потоке как для очень низких, так и для очень высоких чисел Прандтля, в то время как теория [2] – только от 0,7 до 1000. Характерным примером может служить случай теплообмена при турбулентном течении в трубах с ленточными закручивателями потока, если в качестве теплоносителя используется масло марки

"МК", теплофизические свойства которого приведены в [10]. При температуре  $\bar{T} = 50^\circ\text{C}$  число Прандтля для масла марки "МК" равно  $Pr = 2140$  [10], поэтому, используя разработанную в данной работе теорию, получим при  $Re=4 \cdot 10^4$ :  $Nu|_{Pr=2140}^{\bar{T}=50^\circ\text{C}} / Nu|_{Pr=1000} = 1,22$ . Далее, поступив аналогичным образом, при тех же числах Рейнольдса, получим:

$$Nu|_{Pr=7450}^{\bar{T}=30^\circ\text{C}} / Nu|_{Pr=1000} = 1,67; \quad Nu|_{Pr=15800}^{\bar{T}=20^\circ\text{C}} / Nu|_{Pr=1000} = 2,02; \quad Nu|_{Pr=39000}^{\bar{T}=10^\circ\text{C}} / Nu|_{Pr=1000} = 2,53.$$

Следовательно, разработанная теория позволяет в очень значительной степени по сравнению с существующими теориями [1, 2] расширить диапазон своего применения по числу Прандтля при расчёте теплообмена при турбулентном течении в круглых трубах со скрученной лентой. Вышепредставленный теоретический подход к исследованию теплообмена в трубах со скрученной лентой при классических граничных условиях, разработанный в данном исследовании, в дальнейшем применим к исследованию теплообмена для условий однофазного закрученного потока внутри круглой трубы при одностороннем нагреве [3, 8].

Сравнение расчётных значений по теплообмену для условий однофазного закрученного потока при одностороннем нагреве с экспериментом [3, 8] при обязательном выборе соответствующих определяющих параметров в зависимости от числа Рейнольдса для относительных шагов скрученной ленты  $H/D=3,5; 4,8; 8,1; 8,5; 12,6; 16,5; \infty$  (прямая полоса) показало их удовлетворительную корреляцию.

Как уже отмечалось, расчётные данные по теплообмену при турбулентном течении в трубах со скрученной лентой при одностороннем нагреве, полученные по теории, разработанной в данном исследовании, хорошо коррелируют с экспериментом [3, 8], в то время как остальные существующие теории не могут удовлетворительно ему соответствовать, что убедительно доказывает анализ, приведённый в [3]. Следовательно, вышепредставленная теория имеет перед существующими теориями неоспоримое преимущество при расчёте осреднённого теплообмена при турбулентном течении теплоносителя в трубах с ленточными закручивателями потока при одностороннем теплообмене, поэтому её необходимо использовать, несмотря на её относительно более высокую сложность.

Можно заключить, что представленные в настоящей научной работе теоретические расчётные данные достаточно хорошо коррелируют с имеющимся экспериментальным материалом по осреднённому теплообмену в каналах с постоянной закруткой потока при турбулентном течении теплоносителя как при классических граничных условиях [1, 2], так и для условий однофазного закрученного потока при одностороннем нагреве [3, 8] в широкой области определяющих параметров.

В рамках данной работы была разработана теоретическая модель и получены аналитические решения для расчёта теплообмена и гидравлического сопротивления при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена путём закрутки потока с помощью скрученной ленты, отличающаяся от известных моделей более высокой точностью, отсутствием дополнительных допущений, учётом большего числа параметров, оказывающих влияние на процесс интенсифицированного теплообмена. Некоторые из существующих решений [1, 2] могут быть охарактеризованы как частный случай представленных аналитических решений, иными словами: эти аналитические решения являются более сложными по отношению к существующим решениям. Расчётные данные по интенсифицированному теплообмену и гидросопротивлению хорошо соответствуют существующим экспериментальным данным, имея гораздо меньшую погрешность по отношению к последним, чем существующие решения. Решения, полученные в данной работе, гораздо качественнее описывают имеющийся экспериментальный материал, чем существующие; применение точных решений можно считать оправданным, несмотря на их относительную сложность, поскольку они справедливы в довольно широком диапазоне геометрических характеристик скрученной ленты и режимов течения применяемых теплоносителей. Применение разработанной теории позволяет прогнозировать резервы интенсификации теплообмена посредством применения

ленточных закручивателей потока в тех областях, где ещё нет надёжных экспериментальных данных. В представленном научном исследовании теоретические расчётные данные в достаточной степени хорошо коррелируют с имеющимся экспериментальным материалом, как по гидравлическому сопротивлению, так и по осреднённому теплообмену, в каналах с ленточными закручивателями потока при турбулентном течении теплоносителя, как при классических граничных условиях [1–2], так и для условий однофазного турбулентного закрученного потока при одностороннем нагреве [3, 8] в довольно широком диапазоне геометрических характеристик скрученной ленты и режимов течения применяемых теплоносителей существенно перекрывающем диапазон существующего эксперимента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигай, В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В.К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 263 с.
2. Смитберг, Э. Трение и характеристики теплообмена при вынужденной конвекции в трубах с закручивателями из скрученной ленты. – Труды американского общества инженеров-механиков (русский перевод). – Серия С: Теплопередача. – Т.86. – № 1 / Э. Смитберг, Ф. Лэндис. – М.: Мир, 1964. – С. 52–65.
3. Варава, А.Н. Экспериментальное исследование потерь давления и теплообмена при вынужденной конвекции в закрученном потоке при одностороннем нагреве // Труды VI Минского международного форума по теплообмену / А.Н. Варава, А.Н. Дедов, Е.М. Захаров, и др. – Минск, 2008. – С. 1–18.
4. Zimparov V., Petkov V. Compound heat transfer augmentation by a combination of spirally corrugated tubes with a twisted tape // Proc. Compact Heat Exchangers A Festschrift on the 60-th Birthday of Ramesh K. Shah. Proceedings of Compact Heat Exchangers the International Symposium in Grenoble 24 August 2002. – Grenoble, 2002. – p.p. 477–482.
5. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
6. Лобанов, И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: дисс. ... д.т.н. – М., 2005. – 632 с.
7. Лобанов, И.Е. Математическое моделирование предельного теплообмена для турбулизированного потока в каналах / И.Е. Лобанов, А.И. Доценко. – М.: МИКХиС, 2008. – 194 с.
8. Варава, А.Н. Исследование гидравлического сопротивления и теплообмена в однофазном закрученном потоке при одностороннем нагреве / А.Н. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов, В.В. Ягов // Теплофизика высоких температур, 2006. – Т. 44. – № 5. – С. 699–708.
9. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
10. Теория теплообмена / Под ред. А.И.Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. – 683 с.
11. Лобанов, И.Е. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах с помощью периодически поверхностно расположенных турбулизаторов потока прямоугольного поперечного сечения / И.Е. Лобанов, И.В. Антюхов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2013. – № 3–2(299). – С. 22–27.

**Лобанов Игорь Евгеньевич**

Московский авиационный институт (ГТУ), г. Москва

Д.т.н., ведущий научный сотрудник ПНИИ–204

Тел. 8 (495) 158–42–68

E-mail: lloobbaannooff@live.ru

---

I.E. LOBANOV

### MATHEMATICAL MODELING INTENSIFY HEAT PERMANENT SWIRLED INSIDE ROUND PIPE FLOW

*As a result of research the decisions for intensification of heat exchange were received at turbulence current of heat-carriers in the above-stated channels, more general, than existing. The decisions, received in the given research, support by an existing and original experimental material. The existing decisions are a special case of the new decisions. The received experimental data distinguish by originality. The realized theory allows more precisely to predict a level intensification of heat exchange, than available; the theory is necessary for using at operational development existing and development perspective heat exchangers of devices and devices. The application of the developed settlement methods intensification of heat exchange will allow to lower metal-consuming and dimensions, and also temperature of walls perspective heat exchangers of devices with intensification by heat exchange.*

**Keywords:** *the twirled flow braided tape; heat exchange; intensification; mathematical modeling; experiment; turbulence.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Migay, V.K. Modelirovaniye teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya [Text] / V.K. Migay. – L.: Energoatomizdat. Leningradskoye otdeleniye, 1987. – 263 p.
2. Smitberg, E. Treniye i kharakteristiki teploobmena pri vynuzhdennoy konveksii v trubakh s zavikhritelyami iz skruchennoy lenty. – Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov–mekhanikov (russkiy perevod). – Seriya S: Teploperedacha. – T.86. – № 1 [Text] / E. Smitberg, F. Lendis. – M.: Mir, 1964. – p.p. 52–65.
3. Varava, A.N. Eksperimental'noye issledovaniye poter' davleniya i teploobmena pri vynuzhdennoy konveksii v zakruchennom potoke pri odnostoronnem nagreve // Trudy VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu [Text] / A.N. Varava, A.N. Dedov, Ye.M.Zakharov, i dr. – Minsk, 2008. – Sektsiya № 1. Konvektivnyy teplomassoobmen. – Doklad № 1–64. – p.p. 1–18.
4. Zimparov V., Petkov V. Compound heat transfer augmentation by a combination of spirally corrugated tubes with a twisted tape // Proc. Compact Heat Exchangers A Festschrift on the 60–th Birthday of Ramesh K. Shah. Proceedings of Compact Heat Exchangers the International Symposium in Grenoble 24 August 2002. – Grenoble, 2002. – p.p. 477–482.
5. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K. Kalinin, G.A. Dreytser, I.Z. Kopp i dr. – M.: Energoatomizdat, 1998. – 408 p.
6. Lobanov, I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulent–nom techenii v kanalakh: diss. ... d.t.n. M., 2005. – 632 p.
7. Lobanov, I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye predel'nogo teploobmena dlya turbulizirovannogo potoka v kanalakh [Text] / I.Ye. Lobanov, A.I. Dotsenko. – M.: MIKKhIS, 2008. – 194 p.
8. Varava, A.N. Issledovaniye gidravlicheskogo soprotivleniya i teploobmena v odnofaznom zakruchennom potoke pri odnostoronnem nagreve // Teplofizika vysokikh temperatur [Text] / A.N. Varava, A.V. Dedov, A.T. Komov, V.V. Yagov. – 2006. – T. 44. – № 5. – p.p. 699–708.
9. Kutateladze, S.S. Osnovy teorii teploobmena [Text] / S.S. Kutateladze. – M.: Atomizdat, 1979. – 416 p.
10. Teoriya teplomassoobmena [Text] / Pod red. A.I.Leont'yeva. – M.: Izd–vo MGTU im. N.E.Baumana, 1997. – 683 p.
11. Lobanov, I.Ye. Sovremennyye problemy intensifikatsii teploobmena v kanalakh s pomoshch'yu periodicheski poverkhnostnorasplozhennykh turbulizatorov potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya [Text] / I.Ye. Lobanov, I.V. Antyukhov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii, 2013. – №3–2(299). – p.p. 22–27.

### Lobanov Igor Evgenevich

Moscow aviation institute (STU), Moscow

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of PLMS–204

Tel. 8 (495) 158–42–68

E–mail: lloobbaannooff@live.ru

# **КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ**

УДК 621.22:538.975

А.А. ШИШКО, А.С. ПРУШАК, А.Г. ШАГОЙКА, А.Ю. ПАВЛОВСКИЙ,  
Е.И. ЭЙСЫМОНТ, Е.В. ОВЧИННИКОВ, Н.М. ЧЕКАН

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*Разработаны составы композиционных покрытий на базе соединений алюминий–титан–азот для металлообрабатывающего инструмента работающего при повышенных температурах эксплуатации. Исследовано влияние технологических параметров формирования покрытий на функциональные характеристики. Установлено, что оптимальными характеристиками обладают составы в разработанном соотношении компонентов, которое определяется толщиной слоя, количеством слоев, определенным процентным соотношением Al и Ti в материале в целом. Изменение процентного содержания Al:Ti в пределах более или менее разработанного, приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик.*

**Ключевые слова:** покрытие, алюминий, титан, нитриды, структура, свойства, плазма

Современное машиностроение широко применяет инструмент, на рабочую поверхность которого, нанесены композиционные покрытия [1]. К числу наиболее распространенных покрытий для металлообрабатывающего инструмента относят нитрид титана TiN, который наносят с помощью плазмохимических технологий. Покрытие из нитрида титана обеспечивают высокую износостойкость инструмента для холодного деформирования металлических заготовок благодаря предотвращению явлений схватывания и задира [85]. При нанесении покрытий из нитрида титана на металлорежущий инструмент (сверла, фрезы, метчики, зенкеры и т.п.) эффект резко снижается. Это обусловлено использованием повышенных температур для формирования покрытия из TiN (300°C – 500°C), которые вызывают снижение твердости инструмента из-за явления отпуска. Кроме того, несепарированная капельная фаза TiN повреждает режущую крошку, вызывая её затупление и снижение режущей способности [2].

Известно износостойкое покрытие для рабочих поверхностей плунжерных пар топливных насосов [3]. Композиционное покрытие содержит несколько слоев, в т.ч. слой нитрида титана, меди или медьсодержащего сплава и составляет от 0,01 мкм до 0,5 мкм. Такое покрытие наносят в вакуумных установках послойно на подготовленную поверхность деталей плунжерных пар. Данное покрытие обеспечивает высокую износостойкость пар трения в режиме воздействия высоких нагрузок и небольших перемещений. К существенным недостаткам материала относятся недостаточная эффективность для металлорежущего инструмента и плохая смачиваемость смазочно–охлаждающими средами, вследствие наличия поверхностного гидрофобного слоя политетрафторэтилена.

В качестве аналога выбрано следующее покрытие на основе титансодержащих соединений. Покрытие является многослойным, причем внутренний слой выполнен из нитрида титана или титана, а наружный из алмазоподобного продукта, содержащего не более 20% графитовой фазы, при соотношении титана и углерода в этих слоях, равном стехиометрическому в соединении TiC, причем число чередующих слоев составляет от 1 до 6. Композиционный материал для покрытий на основе титансодержащих соединений и легирующих добавок, отличающийся тем, что в качестве функциональной добавки содержит углеродсодержащий алмазоподобный продукт с содержанием графитовой фазы 5% мас. – 20% мас. Характерными признаками аналога являются:

- использование в качестве функционального модификатора углеродсодержащего компонента, включающего алмазоподобную и графитоподобную фракцию при содержании графитоподобной фракции 10% – 20%;

- наличие в материале сочетания титансодержащих и углеродсодержащих компонентов в виде функциональных слоев определенной толщины, при числе сочетаний от 1 до 8;
- стехиометрическое соотношение элементов Ti и C, равное их соотношению в соединении TiC (карбид титана).

К существенным недостаткам материала по аналогу относятся недостаточная эффективность для металлорежущего инструмента и плохая термостойкость [86], которая обусловлена наличием алмазоподобных слоев, адгезионная прочность резко снижается при превышении температуры более  $T=573$  К, в связи с чем данные покрытия не могут эксплуатироваться без подвода внешней смазочно-охлаждающей.

В связи с этим для обработки различного рода инструмента и деталей трения применяют композиционные многослойные покрытия, слои которых выполняют различные функции – формирующую, противоизносную, антикоррозионную, термостойкую.

Предлагаемый состав композиционного материала для покрытий на основе алюминий-титаносодержащих соединений является многослойным, причем внутренний слой выполнен из нитрида титана или титана, а наружный из нитрида титана-нитрида алюминия, процентное содержание Ti и Al в покрытии составляло 50%:50%, причем число чередующих слоев составляет от 1 до 4.

Сопоставительный анализ разработанного состава и аналога, показывает, что разработанный композиционный материал отличается тем, что он дополнительно включает слой (AlTi)N (алтин), который в процессе эксплуатации (обработки металлической детали) обеспечивает высокую износостойкость инструмента и качество обрабатываемой поверхности при высоких температурах эксплуатации. Дополнительный эффект обеспечивается применением многослойного композиционного материала, в котором сочетание «алтин-титан» или «алтин-нитрид титана» повторяется от 1 до 4 раз.

Эффект действия композиционного материала усиливается при соотношении элементов титана и алюминия в слоях, равном их стехиометрическому соотношению в соединении алюминид титана с формулой AlTi.

При формировании композиционного материала применяли слои из титана, нитрида титана (TiN), полученные при магнитной сепарации плазменного потока, слои (AlTi)N (алтины)). Слои наносили на режущие кромки сверл из стали Р6М5 с диаметром рабочей части 0,3, 0,5, 0,8, 1,0, 2,0 мм. Для нанесения композиционного материала использовали серийную установку вакуумного напыления УВНПА-1-001. Установка содержит газовый ионный источник, с помощью которого осуществляли очистку и нагрев изделий, источник плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическими (титан, алюминий) катодами. Слой композиционного материала формировали за один цикл нанесения. Контроль толщины осуществляем расчетным методом, исходя из предварительно определенных значений скорости осаждения. Составы материалов приведены в таблице 1.

Триботехнические испытания композиционного материала проведены по схеме «плоскость-ролик» на установке, разработанной на базе машины трения СМТ-1. Использовали стандартную четырехпроводную схему измерения контактного сопротивления в паре трения. Момент полного износа покрытия определяли по снижению уровня контактного сопротивления до величины 1 мОм, характерной для множественного металлического контакта.

Ресурсные испытания сверл с композиционным покрытием проводили на сверлильной установке при постоянной нагрузке 27,7Н. В процессе испытаний измеряли время сверления одного отверстия и количество сверлений до затупления сверла. В качестве материала для сверления использовали текстолит подделочный марки ПТ толщиной 5 мм.

Результаты испытаний приведены в таблицах 21–22. В таблице 22 приведены сравнительные характеристики различных композиционных покрытий, имеющих одинаковую технологию формирования. Как следует из данных таблицы 21 и 23 разработанные составы композиционного материала для покрытий (составы 2–7) превосходят аналог (состав 1) по комплексу характеристик – имеют более высокую износостойкость и более низкий коэффициент трения.

Таблица 1 – Составы композиционных материалов для покрытий

Компонент	Количество слоев, шт.														
	Толщина одного слоя 0,05 мкм														
	Толщина одного слоя 0,01 мкм	Толщина одного слоя 0,2 мкм	Толщина одного слоя 0,25 мкм	Толщина одного слоя 0,05 мкм											
1 (аналог) [86]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Титансодержащий компонент															
- титан	1	2	2	2	3	-	-	2	-	-	-	-	-	-	
- нитрид титана	2	1	1	1	-	3	4	2	-	-	-	-	-	-	
- алитин ((Al,Ti)N)	5	3	2	1	3	3	1	1	5	5	5	1	1	1	
Углеродсодержащий алмазоподобный компонент (АПП)	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Политетрафторэтилен	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Содержание графитовой фракции, % масс.	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Соотношение элементов Al/Ti	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	2:1	1:2	

Таблица 2 – Триботехнические свойства материалов для покрытий металлообрабатывающего инструмента

Характеристика	Показатели для состава														
	1 (аналог)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Коэффициент трения	0,18	0,2	0,20	0,18	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,19	0,18	0,19	0,18	0,19	0,16
Интенсивность изнашивания $I \times 10^{11} \text{ м}^3/\text{м}$	0,2	0,19	0,15	0,2	0,19	0,16	0,15	0,19	0,2	0,20	0,18	0,19	0,2	0,2	0,19
Время сверления*, сек															
-100 сверлений	1,2	1,3	1,2	1,2	1,0	1,2	1,1	1,5	1,5	1,3	1,5	1,5	1,6	1,5	1,4
-200 сверлений	1,4	1,4	1,6	1,3	2,0	1,5	1,3	3,0	3,0	3,1	2,1	2,0	1,9	1,8	1,9
-300 сверлений	1,5	2,2	2,1	2,0	2,5	2,0	2,4	4,0	4,5	7,0	2,8	3,0	2,2	2,0	2,9
-400 сверлений	2,0	4,8	4,9	4,9	5,0	4,5	4,8	5,0	7,5	21,0	5,6	7,0	6,4	5,0	7,0
-500 сверлений	5,0	11,8	11,9	12	12	7,5	7,4	15,0	16,5	раз-	11,8	12,0	12	17	12
-600 сверлений	12	16,7	17,0	17,2	17,2	12,5	12,0	20,0	21,5	ру-	16,9	16,9	22,0	22,0	22,1
Разрушение															

Примечание – \*сверло диаметром 0,8 мм; контргрело–текстолит подслоный марки ПП.

Оптимальными характеристиками обладают составы в разработанном соотношении компонентов, которое определяется толщиной слоя, количеством слоев, определенным процентным соотношением Al и Ti в материале в целом. Изменение процентного содержания Al:Ti в пределах более или менее разработанного, приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик. [4]

Состав VIII приводит к увеличению коэффициента трения, т.к. уменьшение количества термостойких слоев приводит к уменьшению адгезионной прочности и увеличивает время сверления особенно при большом количестве циклов (500–600 шт.). Уменьшение толщины функциональных слоев мене 0,01 мкм (состав 10) или их увеличение более 0,2 мкм (состав

11) или снижает долговечность покрытия из композиционного материала или не дает дополнительного эффекта при увеличении стоимости покрытия.

Таблица 3 – Сравнительные триботехнические свойства материалов для покрытий металлообрабатывающего инструмента

Состав покрытия	Толщина слоя, мкм	Характеристики	
		Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания $10^{-11}, \text{м}^3/\text{м}$
Без покрытия	–	0,52	1,40
Нитрид титана (подслой АПП+TiN)x4 (разработанный состав)	0,8+(0,05+0,05)x4	0.18	0,2
(TiN+(AlTi)N)x3, нитрид титана (подслой) (разработанный состав)	(0,05+0,05)x4	0.16	0,15
(Ti +(AlTi)N)x4, титан (подслой) + (разработанный состав)	(0,05+0,05)x4	0,15	0,18

Оптимальными характеристиками обладают покрытия из материалов, в которых соотношение элементов Al/Ti равно 1:1 или стехиометрическому соотношению в соединении (AlTi)N (алтин). Превышение содержания алюминия (состав 14) или его уменьшение (состав XV) по отношению к стехиометрическому неблагоприятно сказывается или на росте коэффициента трения или на износостойкости покрытия.

Таким образом, состав в разработанном соотношении компонентов обладает более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с аналогом.

Покрытия из разработанного композиционного материала прошли испытания на ОАО «Белкард» при использовании различного вида металлообрабатывающего инструмента и рекомендованы к промышленному применению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно–технический прогресс в машиностроении: Современные методы упрочнения деталей машин [Текст] / Под ред. К.В. Фролова // Обзор. информ. Выпуск 9. – М., 1991. – 187 с.
2. Комплексный анализ триботехнических свойств многослойных сверхтвердых покрытий [Текст] / Янь Цуань [и др.] // О природе трения твердых тел: межд. симпозиум. – Гомель, ИММС НАНБ. – 2002. – С. 94–95.
3. Композиционное многослойное покрытие: пат. 10924 Респ. Беларусь, МПК (2006) С23С 14/06 / В.А. Струк, Г.А. Костюкович, В.И. Кравченко, Е.В. Овчинников, А.В. Рогачев, А.В. Попов, А.М. Раевич, С.В. Авдейчик; заявитель ОАО «Белкард» – № а 20040490; заявл. 31.05.2004; опубл. 30.08.2008. // «Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы»: Официальный бюллетень национального центра интеллектуальной собственности. – 2008. – № 4. – С. 113.
4. Овчинников, Е.В. Наноструктурированные фторсодержащие покрытия [Текст] / Е.В. Овчинников // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2013. – №3 – 2(299). – С. 60–67.

**Шишко Андрей Александрович**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
студент 5–курса факультета инновационных технологий машиностроения  
e-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Прушак Александр Сергеевич**  
Закрытое акционерное общество «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством»  
соискатель  
e-mail: ipr@sipt.by

**Шагойка Александр Григорьевич**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
аспирант  
e-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Павловский Александр Юрьевич**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
студент 6–го курса  
e-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Чекан Николай Михайлович**  
ГУ «Физико–технический институт НАН Беларуси», г.Минск  
Кандидат физико–математических наук, зав. лабораторией  
e-mail: pec@bas-net.by

**Эйсымонт Евгения Ивановна**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
магистр  
e-mail: gffh@mail.ru

**Овчинников Евгений Витальевич**

УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы»,  
г.Гродно  
кандидат технических наук, зам.  
декана факультета инновационных технологий  
e-mail: ovchin\_1967@mail.ru

---

A.A. SHISHKO, A.S. PRUSHAK, A.G. SHAGOYKA, A.YU. PAVLOVSKY,  
E.I. EYSYMONT, E.V. OVCHINNIKOV, N.M. CHEKAN

**TRIBOTECHNICAL COMPOSITE COATING FOR TOOL MACHINED METAL**

*The compositions of composite coatings based compounds aluminum–titanium – nitrogen for metalworking tools operating at elevated operating temperatures . The influence of technological parameters for the formation of coatings on functional characteristics. It was established that the compositions exhibit optimum performance in relation to the developed components , which is determined by layer thickness , number of layers , a certain percentage ratio of Al and Ti in the material as a whole. Changing the percentage of Al: Ti in the range of more or less elaborate, leading to a deterioration in performance.*

**Keywords:** cover , aluminum, titanium nitride, structure, properties , plasma

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nauchno–tekhnicheskiy progress v mashinostroyenii: Sovremennyye metody uprochneniya detaley mashin [Text] / Pod red. K.V. Frolova // Obzor. inform. Vypusk 9. – M., 1991. – 187 p.
2. Kompleksnyy analiz tribotekhnicheskikh svoystv mnogoslownykh sverkhtverdykh pokrytiy [Text] / Yan' Tsuan' [i dr.] // O prirode treniya tverdykh tel: mezhd. simpozium. – Gomel', IMMS NANB. – 2002. – p.p. 94 –95.
3. Kompozitsionnoye mnogoslownoye pokrytiye: pat. 10924 Resp. Belarus', MPK (2006) C23C 14/06 / V.A. Struk, G.A. Kostyukovich, V.I. Kravchenko, Ye.V. Ovchinnikov, A.V. Rogachev, A.V. Popov, A.M. Radevich, S.V. Av-deychik; zayavitel' OAO «Belkard» – № a 20040490; zayavl. 31.05.2004; opubl. 30.08.2008. // «Izobreteniya. Poleznye modeli. Promyshlennyye obraztsy»: Ofitsial'nyy byulleten' natsional'nogo tsentra intellektual'noy sobstvennosti. – 2008. – № 4. – p. 113.
4. Ovchinnikov Ye.V. Nanostrukturirovannyye ftorsoderzhashchiye pokrytiya [Text] / Ye.V. Ovchinnikov // Fundamental'nyye problemy tekhniki i tekhnologii.–2013. –№3 –2(299). – p.p. 60–67.

**Shishko Andrey**

UO "Grodno State University Yanka Kupala" Grodno  
5 student – faculty course innovative engineering technology  
e-mail: ovshin\_1967@mail.ru

**Prushak Alexander**

Closed Joint Stock Company "Soligorsk Institute of Resource with pilot production"  
to applicants  
e-mail: ipr@sipr.by

**Shagoyka Alexander**

UO "Grodno State University Yanka Kupala" Grodno  
graduate student  
e-mail: ovshin\_1967@mail.ru

**Pavlovsky Alexander**

UO "Grodno State University Yanka Kupala " Grodno  
student 6th year  
e-mail: ovshin\_1967@mail.ru

**Auchynnikaou Yauheni**

UO "Grodno State University Yanka Kupala" Grodno  
Ph.D., deputy. Dean of the Faculty of innovative technologies  
e-mail: ovshin\_1967@mail.ru

**Eisymont Evgenia**

UO "Grodno State University Yanka Kupala" Grodno  
master  
e-mail: gffh@mail.ru

**Chekan Nikolai**

GU "Physico– Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus ", Minsk  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head. Laboratory

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО СВЕРЛЕНИЯ

*В статье рассматривается экспериментальное устройство для вибрационного сверления отверстий малого диаметра. Описаны его конструктивные особенности принцип работы.*

**Ключевые слова:** сверление, устройство, отверстия, производительность, вибрации, стойкость, прочность.

Отверстия цилиндрической формы являются конструктивным элементом многих типов деталей: от валов и осей до корпусных деталей, которые находят применение в машинах и механизмах различного назначения.

Для получения глубоких отверстий используются в основном методы:

- сплошного сверления, при котором весь материал, расположенный в объеме будущего отверстия, измельчается в стружку;
- кольцевого сверления, при котором в стружку переходит только кольцевая полость.
- электрохимическая обработка.

Первый метод получил гораздо большее распространение на практике, так как процесс кольцевого сверления отличается меньшей надежностью и большей сложностью осуществления. Кроме того, метод кольцевого сверления применяется для сверления отверстий относительно большого диаметра, более 30 мм [1].

Электрохимическая обработка основана на явлении анодного растворения металла в электролите под действием постоянного электрического тока, однако, его практическое применение является дорогостоящим при массовом и серийном производстве.

Задача повышения надежности процесса сверления глубоких отверстий особенно актуальна при обработке отверстий малого диаметра (до 5 мм), при заданной величине вылета инструмента прочность сверла резко снижается с уменьшением его диаметра. Сверление отверстий малого диаметра широко распространено в промышленности: при изготовлении оборудования топливной аппаратуры, авиа и ракетостроении.

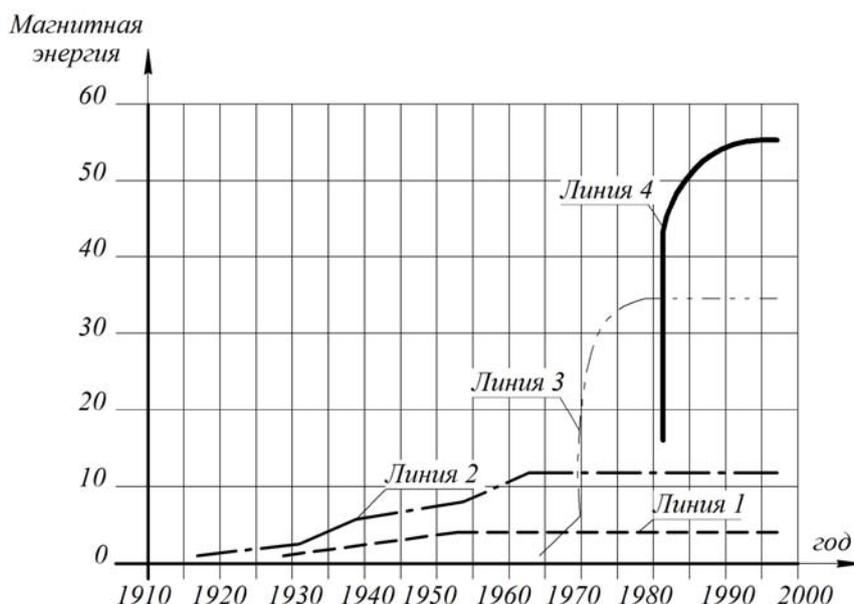
Сверление изделий из титановых сплавов имеет свои особенности, выражающиеся в специфических требованиях, предъявляемых к качеству деталей из данного материала. Однако их важным преимуществом является высокая надежность, обусловленная отсутствием продуктов коррозии в системах, относительно малая тепловая деформация из-за низкого коэффициента теплового расширения, отсутствие струевой коррозии [2].

Одним из наиболее перспективных методов для повышения производительности сверления титановых сплавов является вибрационное резание [3].

В настоящее время известно большое количество вибровозбудителей разных типов и компоновок, которые устанавливаются на станках, где реализуют процесс вибрационной обработки. Но применение большинства из них не осуществимо для станков имеющих вертикальное расположение шпинделя. Однако это становится возможным при использовании электромагнитных и электродинамических вибровозбудителей. Электромагнитные и электродинамические вибраторы имеют широкие возможности по возбуждению колебаний большого диапазона частот (вплоть, до ультразвуковых). Но они работоспособны лишь при небольших силах резания вследствие своей малой удельной мощности. Тем не менее, использование вибраторов такого вида вполне приемлемо при вибрационном сверлении отверстий малого диаметра [4].

Однако сложная конструкция электродинамического вибровозбудителя, а именно электрическая схема подключения катушек, а так же передача вибраций на шпиндель станка, приводящая к сокращению ресурса станочного оборудования увеличивает себестоимость обработки. Применение вибрационного оборудования на основе постоянных магнитов позволит значительно снизить его себестоимость.

В течение последних лет свойства постоянных магнитов заметным образом изменились, что хорошо видно из приведенной ниже диаграммы (рисунок 1) [5].



**Рисунок 1 – Диаграмма изменения постоянных магнитов**  
 Линия 1 – ферритовые магниты; Линия 2 – алюминиево-никелевые;  
 Линия 3 – самарий – кобальтовые магниты; Линия 4 – неодим – железо – боровые

Линия 1 показывает динамику развития свойств ферритовых магнитов, именно тех, которые используются обычно в защелках, динамиках и т.п.

Линия 2 – магнитные алюминий-никелевые сплавы, применяемые обычно в радио и телевизионной аппаратуре.

Линия 3 и Линия 4 – соответствуют новому виду магнитов, изготавливаемых на основе редкоземельных элементов. Линия 3 – самарий – кобальтовые магниты, Линия 4 – неодим – железо – боровые.

Как видно из диаграммы магнитная энергия самариевых магнитов в 6 раз выше, а неодимовых в 10 раз выше, чем у ферритовых (керамических) изделий.

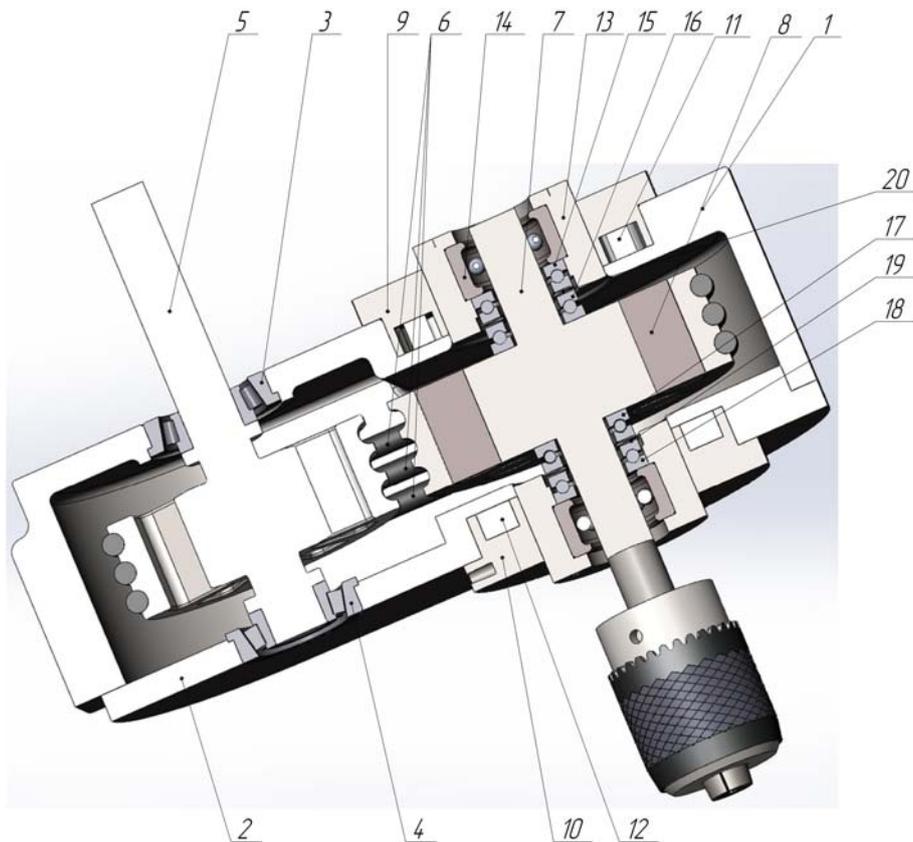
На практике это означает, что неодимовый магнит, небольшого размера, способен создавать механические усилия, которые вполне соответствуют усилиям, характерным для обычных машин и механизмов, т. е – десятки и сотни килограммов.

Сущность работы спроектированного устройства для вибрационного сверления поясняется на рисунке 2, на котором показано устройство для вибрационного сверления в разрезе.

Спроектированное устройство для вибрационного сверления содержит корпус 1 и крышку корпуса 2, в которых посредством подшипников 3,4 закреплен входной вал 5. Вращение с входного вала посредством гибкой связи 6 передается на выходной вал 7, на котором расположены магниты 8. При вращении выходного вала магниты взаимодействуют с расположенными в магнитных корпусах 9,10 магнитами 11, установленными таким образом, чтобы соблюдалась обратная полярность относительно магнитов 8 расположенных в выходном валу 7. В процессе взаимодействия создаются вибрации, частота которых определяется количеством магнитов 8 в выходном валу 7 и магнитов 11 в магнитных корпусах 9, 10.

Усилие вибрации регулируется расстоянием между магнитами 8 выходного вала 7 и магнитами 11,12 расположенными в корпусах магнитов 9,10 регулирующимися посредством резьбы на корпусе 1 и крышке корпуса 2 устройство для вибрационного сверления, и магнитных корпусах 9,10. Амплитуда вибрации ограничивается регулировочной гайкой 13, в которой находится подшипник 14 с возможностью осевого перемещения и между регулировочной гайкой 13 и выходным валом 7 находятся упорные подшипники 15,16,17,18, между которыми находятся пружины 19,20 для гашения ударов между выходным валом 7 и регулировочной гайкой 13.

Амплитуда вибрации ограничивается регулировочной гайкой, в которой находится подшипник с возможностью осевого перемещения и между регулировочной гайкой и выходным валом находятся упорные подшипники, между которыми находятся пружины для гашения ударов между выходным валом и регулировочной гайкой.



**Рисунок 2 – Устройство для вибрационного сверления**

1 – корпус 2 – крышка корпуса; 3,4 – подшипники; 5 – входной вал; 6 – гибкая связь; 7 – выходной вал; 8 – магниты; 9, 10 – магнитные корпуса; 11, 12 – магниты; 13 – гайка; 14 – подшипник; 15, 16, 17, 18 – упорные подшипники; 19, 20 – пружины

Устройство работает следующим образом: в шпинделе станка закрепляется входной вал 5 вибросверлильного устройства, затем фиксируется корпус 1 вибросверлильного устройства. Подбирается количество магнитов 8, 11, 12 исходя из нужной частоты вибрации. Магнитные корпуса 9, 10, с магнитами закручивают в корпусе 1 и крышке корпуса 2 устройство для вибрационного сверления, тем самым устанавливают осевую силу вибрации. После настройки включается вращения шпинделя и производится обработка.

Трехмерная модель устройства представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Модель корпуса устройства для вибрационного сверления**

Разработанная модель позволит повысить технологичность устройства для вибрационного сверления и снизить вибрации, передаваемые на шпиндель станка, а именно, к приспособлениям для металлорежущих станков, относящихся к сверлильно–расточной и фрезерной группе с вертикальным расположением шпинделя для увеличения производительности и улучшения качества формообразования отверстий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драчев, О.И. Повышение эффективности вибрационного сверления глубоких отверстий [Текст] / О.И. Драчев, А.О. Драчев, Г.В. Тараненко, В.А. Тараненко. – Старый Оскол: ТНТ. – 2010. – 220 с.
2. Капырин, Г.И. Титановые сплавы в машиностроении. [Текст] / Г.И. Капырин, Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
3. Масленников, А.В. Использование вибрационного резания для управления стружкообразованием [Текст] / А.В. Масленников, С.А. Чевычелов, Д.И. Гвоздев, В.В. Сидорова, М.Ш. Гатиев // Известия Юго–Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии, 2012. – № 2–1. – С. 117–120.
4. Масленников, А.В. Проектирование электромагнитного привода возбудителя высокочастотных вибраций [Текст] / А.В. Масленников, А.И. Барботько, И.В. Бондарцев // Вестник машиностроения, 2007. – №10. – С. 19–21.
5. Абушенко, А.В. О постоянных магнитах для простого инженера – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <http://c-a-m.narod.ru/techno/magnit.html> (дата обращения 27.03.2014).

**Сидорова Виктория Викторовна**

ФГБОУ ВПО Юго–Западный государственный университет, г. Курск  
Аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования  
Тел.: 8 910 213 38 16  
E–mail: VictoriaMoiaPobeda@yandex.ru

**Разумов Михаил Сергеевич**

ФГБОУ ВПО Юго–Западный государственный университет, г. Курск  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры городского, дорожного строительства и строительной механики  
Тел.: 8 908 229 27 77  
E–mail: mika\_1984\_@mail.ru

---

V.V. SIDOROVA, M.S. RAZUMOV

### DEVICE FOR VIBRATION DRILLING

*This article discusses an experimental device for vibration drilling small holes. Describes its design features principle.*

**Keywords:** *drilling holes, performance, vibration, chip control, durability, strength*

### BIBLIOGRAPHY

1. Drachev, O.I. Povysheniye effektivnosti vibratsionnogo sverleniya glubokikh otverstiy [Text] / O.I. Drachev, A.O. Drachev, G.V. Taranenko, V.A. Taranenko. – Staryy Oskol: TNT. – 2010. – 220 p.
2. Kapyrin, G.I. Titanovyye splavy v mashinostroyenii. [Text] / G.I. Kapyrin, B.B. Chechulin, S.S. Ushkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 248 p.
3. Maslennikov, A.V. Ispol'zovaniye vibratsionnogo rezaniya dlya upravleniya struzhkoobrazovaniyem [Text] / A.V. Maslennikov, S.A. Chevychelov, D.I. Gvozdev, V.V. Sidorova, M.SH. Gatiyev // Izvestiya Yugo–Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii, 2012. – № 2–1. – p.p. 117–120.
4. Maslennikov, A.V. Proyektirovaniye elektromagnitnogo privoda vzbuditelya vysokochastotnykh vibratsiy [Text] / A.V. Maslennikov, A.I. Barbot'ko, I.V. Bondartsev // Vestnik mashinostroyeniya, 2007. – №10. – p.p. 19–21.
5. Abushenko, A.V. O postoyannykh magnitakh dlya prostogo inzhenera – [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <http://c-a-m.narod.ru/techno/magnit.html> (data obrashcheniya 27.03.2014).

**Sidorova Viktoriya Viktorovna**

Southwest State University, Kursk  
Post – graduate Student  
E–mail: VictoriaMoiaPobeda@yandex.ru

**Razymov Mikhail Sergeevich**

Southwest State University, Kursk  
Candidate of Technical Sciences  
E–mail: mika\_1984\_@mail.ru

УДК 621.9.01

Л.Г. НИКИТИНА, В.С. ПУТЫРСКИЙ, А.С. ВОЛКОВА

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ НА СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Рассмотрено состояние режущей части инструмента путем анализа термических напряжений намагниченного режущего инструмента, возникающих в процессе резания. Выбран критерий оценки прочностных свойств инструмента. Даны рекомендации по использованию намагниченного режущего инструмента по термодинамическим параметрам. Представлены результаты производственных испытаний концевых фрез, упрочненных импульсным намагничиванием. Предложен критерий оценки стойкости режущего инструмента.*

**Ключевые слова:** прочность, стойкость, импульсное намагничивание, термические напряжения, режущий инструмент.

Повышение стойкости металлорежущего инструмента является актуальной задачей машиностроительного производства. Одним из возможных методов улучшения стойкости инструмента является импульсное намагничивание его режущей части. Исследования, посвященные магнитно-импульсному упрочнению, проводятся в течение нескольких десятков лет учеными различных стран. Технологический эффект по стойкости инструмента неизменно был положительным и составлял от 30 до 300% [1].

Вопрос состоит в том, каким образом можно оценить прочностное качество инструмента после его намагничивания. Оценка прочности одним или двумя параметрами (коэрцитивной силой или проницаемостью) не является всеобъемлющей и достаточно точной. Поэтому важно найти способ, позволяющий объективно решить данную проблему.

В статье делается попытка оценить состояние режущей части намагниченного и ненамагниченного инструмента путем анализа аналитических зависимостей термического напряжения, возникающих в процессе резания и вызывающих хрупкое разрушение инструмента.

Известно, что для хрупких тел величина термических напряжений в какой-либо точке  $x$  режущей части инструмента для случая нагрева и охлаждения определяется уравнениями [1]:

$$\sigma_{\theta} \cong E \cdot \alpha (1-\nu)^{-1} \left(1 - \frac{I}{h}\right) \left[ \theta_k - (\theta_k - \theta_0) \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{F_{ox}}} \right]; \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta} \cong E \cdot \alpha (1-\nu)^{-1} \left(1 - \frac{I}{h}\right) \left\{ \theta_k - (\theta_k - \theta_0) \left[ \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_{ox}}} - e^{Bi_x} + Bi_x^2 F_{ox} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{F_{ox}}} + Bi_x \sqrt{F_{ox}} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;  
 $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $x$  – координата рассматриваемой точки;  
 $\theta_k$  – температура на контактных поверхностях;  
 $\theta_0$  – температура окружающей среды;  
 $F_{ox} = \lambda \cdot t / c \cdot \rho \cdot x^2$  – число Фурье для координаты  $x$ ;

$\lambda$  – теплопроводность;  
 $C$  – удельная теплоемкость;  
 $\rho$  – плотность;  
 $h$  – высота тела инструмента;  
 $I$  – расстояние режущей части инструмента до нейтральной линии;  
 $Bi_x = \alpha x / \lambda$  – критерий Био;  
 $\operatorname{erf}$  – интеграл вероятности ошибок;

$$\left[ \Phi(x) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt \right]; \quad \operatorname{erfc} = 1 - \Phi(x) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt$$

мента.

Как видно по уравнениям (1) и (2) термические напряжения для заданного момента времени зависят от комплекса физических характеристик материала инструмента и охлаждающей среды.

Термические напряжения, в какой либо точке в каждый момент времени могут быть растягивающими или сжимающими. В процессе резания в зоне контакта происходит суммирование сжимающих механических и термических напряжений, а вне контактной зоны термические и механические напряжения могут иметь разный знак [1].

Быстрый нагрев и охлаждение во время прерывистого резания вызывают термические «удары», температурное поле в поверхностных слоях характеризуется высокими градиентами температур и термические напряжения  $\sigma_\theta$  при высоких контактных температурах достигают значительных величин. Если величина  $\sigma_\theta$  превысит предел прочности  $\sigma_b$ , то образуются трещины и начинается хрупкое разрушение [1].

Воспользуемся последней рекомендацией ( $\sigma_\theta < \sigma_b$ ) в качестве критерия оценки прочностных свойств инструмента.

Для этого необходимо провести расчет зависимости термических напряжений от температуры  $\theta_k$  согласно формулам (1) и (2) при известных значениях параметров, входящих в эти формулы после импульсного намагничивания, далее необходимо сравнить полученные значения термических напряжений с механическими нагружающими напряжениями.

Расчеты проведены для твердого сплава ВК4 и быстрорежущей стали Р6М5 для точки, отстоящей от режущей кромки на глубине  $x=0,5$  мм и при  $t=0,01$  с и температурах  $\theta_k = 1273$  К,  $\theta_0 = 293$  К.

Исследования физических и механических характеристик твердых сплавов при магнитно-импульсной обработке [2] показывают снижение температурного коэффициента линейного расширения на 1.5...3%, увеличение теплопроводности и теплоемкости на 10...15%. Относительно модуля упругости и коэффициента Пуансона исследования [3] говорят об их незначительном снижении, которыми можно в расчетах пренебречь.

Полученные расчетные результаты показаны на рисунке 1 а, б, в, г, из которых видно:

1. Для твердого сплава ВК4 при нагреве (рис. 1, а) термические напряжения ослабляются при импульсном намагничивании (прямая 2), что расширяет температурный диапазон использования инструмента на 50...70°C. Использование намагниченного инструмента при температуре выше 370°C нецелесообразно, так как эффекта увеличения прочности нет. При охлаждении (рис. 1, б), хотя и наблюдается эффект ослабления термических напряжений (сравниваются прямые 2 и 1), однако использовать инструмент при температурах выше 120°C нельзя, так как в этом диапазоне температур термические напряжения выше нагружающих механических напряжений.

2. Для быстрорежущей стали Р6М5 при нагреве (рис. 1, в) практически можно использовать весь диапазон температур как для ненамагниченного, так и для намагниченного инструмента. Наблюдается ослабление термических напряжений (прямая 2), что еще больше расширяет температурный диапазон. При охлаждении (рис. 1, г) температурный диапазон значительно сужается до 300°C.

Анализ проведенных расчетов с учетом комплекса физико-механических параметров намагниченных инструментальных материалов позволяет сделать вывод о том, что эффект ослабления термических напряжений у намагниченных инструментальных материалов имеется, однако этот эффект незначительный (порядка 10...15% по предложенной методике), поэтому использование намагниченного инструмента возможно при строгом соблюдении технологических норм термодинамических параметров.

Другим свойством режущего инструмента является его стойкость. Влияние импульсного намагничивания на стойкость режущего инструмента исследовано в производственных условиях на примере концевых фрез [4].

В производственных условиях фрезы испытывались с использованием критерия равного или оптимального износа. Для этого фиксировалось количество деталей и рассчитывалось время наработки. При этом велось наблюдение за состоянием износа режущей части инструмента и при достижении установленного критерия равного износа (задиры поверхности обрабатываемого материала) дальнейшую работу прекращали и заменяли изношенный инструмент на новый. Полученные результаты сравнивались с контрольными или со справочными значениями периода стойкости фрез.

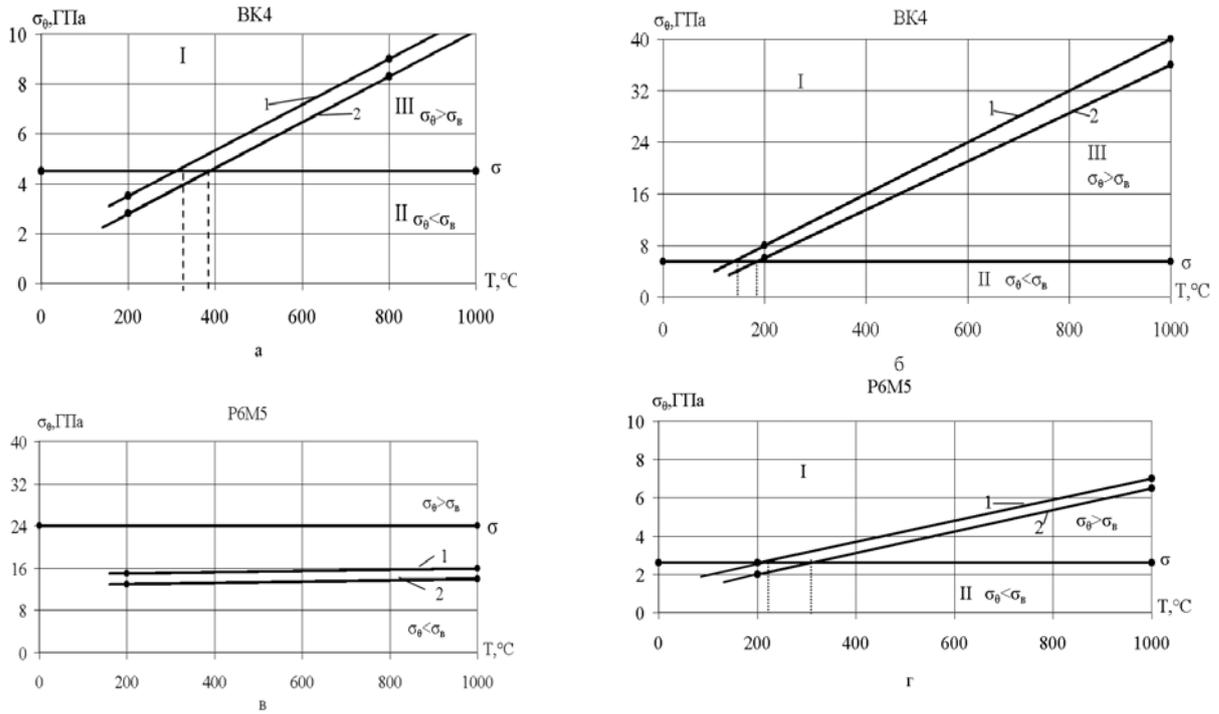


Рисунок 1 – Зависимость термических напряжений  $\sigma_\theta$  от температуры режущей кромки инструмента  
1 – немагнитный инструмент; 2 – намагнитный инструмент

Эффект износа рассчитывали по формулам:

$$\mathcal{E}_u \% = \frac{\Delta D \cdot 100}{D_k} \text{ или } \mathcal{E}_u \% = \frac{\Delta T_n \cdot 100}{T_k}, \quad (3)$$

где  $\Delta D = D_0 - D_k$  – превышение количества изготовленных деталей;

$\Delta T = T_0 - T_k$  – превышение времени наработки;

$D_o$  – количество деталей, изготовленных намагнитными фрезами;

$D_k$  – количество контрольных деталей, изготовленных немагнитными фрезами;

$T_o$  – время наработки намагнитных фрез;

$T_k$  – контрольное время наработки.

Время наработки соответствует машинному времени.

Испытания концевых фрез  $\varnothing 10$  из быстрорежущей стали P6M5 при фрезеровании окна детали «клин» изготовленную из стали 20X показали, что намагнитные фрезы обработали количество деталей в среднем на 125,5% больше, чем немагнитные (101 шт. по отношению к 45 шт.). Среднее время наработки без переточки намагнитных фрез составило 4,6 часа, а время наработки немагнитных фрез 2,04 часа. Необходимо отметить, что стандартное среднее значение периода стойкости для концевых фрез диаметром до 20 мм составляет 80 мин.

Производственные испытания концевых фрез  $\varnothing 12$  из быстрорежущей стали P6M5 при фрезеровании проема (окна) детали «клин» изготовленной из стали 18XГТ показали, что намагнитные фрезы обрабатывали в среднем 115 деталей и наработали в среднем 5,26 ч. Это больше, чем у немагнитных фрез на 155,5%.

Фрезы работали на режимах резания: частота вращения фрез 400 об/мин при подаче стола 50 мм/мин), режим работы фрез не нарушался.

Выводы:

- намагничивание увеличивает прочность инструментального материала за счет ослабления термических напряжений;
- использование намагнитного инструмента возможно при строгом соблюдении технологических норм термодинамических параметров;

- относительная стойкость концевых фрез Ø10 при производственных испытаниях составила 125,5%;
- относительная стойкость концевых фрез Ø12 при производственных испытаниях составила 155,5%;
- увеличение стойкости концевых фрез подтверждают перспективность применения импульсного намагничивания для режущих инструментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента [Текст] / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Малыгин, Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин [Текст] / Б.В. Малыгин. – М.: Машиностроение, 1989 – 112 с.
3. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов [Текст] / Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий. – М.: Metallurgiya, 1980. – 320 с.
4. Путырский, В.С. Влияние импульсного намагничивания на стойкость режущего инструмента. [Текст] / В.С. Путырский, Л.Г. Никитина // Сб. трудов «Научные достижения Муромских ученых» – Муром, Изд.– полиграфический центр, МИ ВлГУ, 2000 – 94 с.

**Никитина Любовь Геннадьевна**  
Муромский институт (филиал)  
Владимирского государственного  
университета, г. Муром  
К.т.н., доцент кафедры автоматизи-  
рованного проектирования маши-  
н и технологических процессов  
Тел. (49234)77145  
E-mail: nikitina-nlg@yandex.ru

**Путырский Владимир Семенович**  
Кандидат технических наук, до-  
цент. Израиль.

**Волкова Анастасия Сергеевна**  
Муромский институт (филиал)  
Владимирского государственного  
университета, г. Муром  
Магистр кафедры автоматизиро-  
ванного проектирования машин и  
технологических процессов  
Тел. (49234)77145

---

L.G. NIKITINA, V.S. PUTYRSKIY, A.S. VOLKOVA

## INFLUENCE OF PULSE MAGNETIZATION ON CONDITION OF CUTTING TOOLS

*The state of cutting part of instrument is considered by the analysis of thermal tensions of the magnetized toolpiece, arising up in the process of cutting. The criterion of estimation of prochnostnykh properties of instrument is chosen. Dany recommendation on the use of the magnetized toolpiece on thermodynamics parameters. The results of production tests of end milling cutters, work-hardened the impulsive magnetizing are presented. The criterion of estimation of firmness of toolpiece is offered.*

**Keywords:** strength, resistance, pulse magnetization, thermal stress, the cutting tool.

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Loladze, T.N. Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta [Text] / T.N. Loladze. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 320 p.
- [2] Malygin, B.V. Magnitnoye uprochneniye instrumenta i detaley mashin [Text] / B.V. Malygin. – M.: Mashinostroyeniye, 1989 – 112 p.
- [3] Livshits B.G. Fizicheskiye svoystva metallov i splavov [Text] / B.G. Livshits, V.S. Kraposhin, YA.L. Linetskiy. – M.: Metallurgiya, 1980. – 320 p.
- [4] Putyrskiy, V.S. Vliyaniye impul'snogo namagnichivaniya na stoykost' rezhushchego instrumenta. [Text] / V.S. Putyrskiy, L.G. Nikitina // Sb. trudov «Nauchnyye dostizheniya Muromskikh uchenykh» – Murom, Izd.– poligraficheskiy tsentr, MI VIGU, 2000 – 94 p.

**Nikitina Lyubov Gennadyevna**  
Murom Institute of Vladimir State Uni-  
versity, Murom  
Ph.D., assistant professor of the depart-  
ment " Automated design of machines"  
Phone: (49234) 77145  
E-mail: nikitina-nlg@yandex.ru

**Putyrskiy Vladimir Semenovich**  
Ph.D., assistant professor

**Volkova Anastasiya Sergeevna**  
Master of the department " Auto-  
mated design of machines"  
Phone: (49234) 77145

О.Н. КРАХМАЛЕВ, Д.И. ПЕТРЕШИН

## СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ В МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ

*Представлена методика определения собственных частот и форм свободных упругих колебаний, возникающих в манипуляционных системах с тремя степенями свободы, рассмотрен пример использования методики.*

**Ключевые слова:** Манипуляционные системы, упругие колебания, собственные частоты.

Манипуляционные системы роботов структурно представляют собой разомкнутую кинематическую цепь, состоящую из звеньев, соединённых между собой кинематическими парами пятого класса. Свободные колебания в упругой манипуляционной системе возникают после остановки манипулятора в точке позиционирования. В этом положении приводы манипуляционной системы заторможены. Будем считать, что упругая податливость сосредоточена в сочленениях звеньев манипулятора и учитывается в направлениях обобщённых координат, соответствующих этим сочленениям. [1]

Пусть  $\{q\}=[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  – вектор обобщённых координат соответствующий точке позиционирования. Малые упругие отклонения обобщённых координат от этого положения обозначим  $\{\Delta q\}=[\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n]^T$  и разложим его на составляющие  $\{\Delta q\}=\{\Delta q_s + \Delta q_d\}$ , где  $\Delta q_{si}$  – малая статическая деформация в  $i$ -ой кинематической паре в положении равновесия,  $\Delta q_d$  – малая упругая деформация, соответствующая свободным колебаниям в  $i$ -ой кинематической паре. Положению равновесия соответствует:  $\{\dot{q}\}=0, \{\ddot{q}\}=0$ .

Уравнение равновесия манипуляционной системы имеет вид

$$Q_{Gi} = -c_i \Delta q_{si}, \quad i=(1, \dots, n), \quad (1)$$

где  $Q_{Gi}$  –  $i$ -я обобщённая сила, соответствующая силам тяжести звеньев,  $c_i$  – коэффициент жёсткости  $i$ -ой кинематической пары.

Уравнение свободных колебаний манипуляционной системы около положения статического равновесия имеет вид

$$[M]\{\Delta \ddot{q}_d\} + [C]\{\Delta q_d\} = 0, \quad (2)$$

где  $[C]=\text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_n)$  – диагональная матрица жёсткости.

Частное решение уравнения (2) будем искать в виде

$$\{\Delta q\} = \{h\} \cos(kt + \phi), \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) получим линейное векторное уравнение:

$$([C] - k^2 [M])\{h\} = 0, \quad (4)$$

Тривиальное решение при  $\{h\}=0$  соответствует положению равновесия. Ненулевые решения уравнения (4) соответствуют условию

$$\det([C] - k^2 [M]) = 0, \quad (5)$$

Элементы матрицы  $[M]$  определяются выражением [3]:

$$[M] = [m_{ij}], \quad (6)$$

$$m_{ij} = \sum_{l=1}^n \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0l}}{\partial q_i} H_l \frac{\partial A_{0l}^T}{\partial q_j} \right),$$

$(i, j = (1, \dots, n))$

С учётом выражения (6) полагая, что если  $i > l$  то  $\frac{\partial A_{0l}}{\partial q_i} = 0$ , для элементов матрицы  $[M]$

уравнение (5) может быть представлено в развёрнутом виде:

$$\begin{pmatrix} c_1 - k^2 \sum_{l=1}^n \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,l}}{\partial q_1} H_l \frac{\partial A_{0,l}^T}{\partial q_1} \right) & -k^2 \sum_{l=2}^n \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,l}}{\partial q_1} H_l \frac{\partial A_{0,l}^T}{\partial q_2} \right) & \dots & -k^2 \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_1} H_n \frac{\partial A_{0,n}^T}{\partial q_n} \right) \\ -k^2 \sum_{l=2}^n \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,l}}{\partial q_2} H_l \frac{\partial A_{0,l}^T}{\partial q_1} \right) & c_2 - k^2 \sum_{l=2}^n \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,l}}{\partial q_2} H_l \frac{\partial A_{0,l}^T}{\partial q_2} \right) & \dots & -k^2 \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_2} H_n \frac{\partial A_{0,n}^T}{\partial q_n} \right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -k^2 \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_n} H_n \frac{\partial A_{0,n}^T}{\partial q_1} \right) & -k^2 \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_n} H_n \frac{\partial A_{0,n}^T}{\partial q_2} \right) & \dots & c_n - k^2 \text{tr} \left( \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_n} H_n \frac{\partial A_{0,n}^T}{\partial q_n} \right) \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

Уравнение (7) является частотным уравнением манипуляционной системы, а  $k$  – собственной частотой упругих колебаний манипуляционной системы. В силу положительной определённости матриц  $[M]$  и  $[C]$  это уравнение всегда имеет  $n$  действительных положительных корней  $k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2$ , среди которых могут быть и кратные.

Для манипуляционной системы с тремя степенями свободы ( $n=3$ ) частотное уравнение (7), будет иметь вид [2]:

$$\begin{vmatrix} c_1 - k^2 m_{11} & -k^2 m_{12} & -k^2 m_{13} \\ -k^2 m_{21} & c_2 - k^2 m_{22} & -k^2 m_{23} \\ -k^2 m_{31} & -k^2 m_{32} & c_3 - k^2 m_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

Развернув определитель уравнения (8), имеющий порядок  $n=3$ , получим кубичное уравнение, содержащее неизвестную частоту  $k$ :

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0$$

$$x = k^2,$$

$$a = \frac{c_1(m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}) + c_2(m_{11}m_{33} - m_{13}m_{31}) + c_3(m_{11}m_{22} - m_{12}m_{21})}{m_{11}(m_{23}m_{33} - m_{22}m_{33}) + m_{12}(m_{21}m_{33} - m_{23}m_{31}) + m_{13}(m_{22}m_{31} - m_{21}m_{32})},$$

$$b = \frac{-(c_1c_2m_{33} + c_1c_3m_{22} + c_2c_3m_{11})}{m_{11}(m_{23}m_{33} - m_{22}m_{33}) + m_{12}(m_{21}m_{33} - m_{23}m_{31}) + m_{13}(m_{22}m_{31} - m_{21}m_{32})}$$

$$c = \frac{c_1c_2c_3}{m_{11}(m_{23}m_{33} - m_{22}m_{33}) + m_{12}(m_{21}m_{33} - m_{23}m_{31}) + m_{13}(m_{22}m_{31} - m_{21}m_{32})} \quad (9)$$

Кубичное уравнение (9) может быть преобразовано подстановкой  $x = z - \frac{a}{3}$  к виду:

$$z^3 + pz + q = 0$$

$$p = -\frac{a^2}{3} + b, \quad (10)$$

$$q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c$$

Корни уравнения (10) определяются по одному из известных методов, например по тригонометрическому методу. Во всех случаях берётся действительное значение кубического корня.

Подставляя корни  $k_l^2, l=(1, \dots, n)$  уравнения (7) в уравнение (4) получим совокупность систем однородных алгебраических уравнений, определитель которых равен нулю:

$$\begin{aligned} ([C] - k_l^2 [M]) \{h_l\} &= 0, \\ l &= (1, \dots, n) \end{aligned} \tag{11}$$

Каждая из систем уравнений (11) имеет бесконечное множество решений, однако число линейно независимых решений равно  $n$ . [4]

Линейно независимые векторы  $\{h_l\}$ ,  $l=(1, \dots, n)$  называются собственными формами колебательной системы и определяются путём произвольного задания (выбора) одной из компонент в каждом векторе. Собственные формы колебательной системы отражают соотношения амплитуд упругих гармонических колебаний.

Существование нескольких собственных частот указывает на неполноту записи решения уравнения (2) в форме (3). Общее решение уравнения (2) может быть записано в виде:

$$\{\Delta q\} = \sum_{l=1}^n d_l \{h_l\} \cos(k_l t + \varphi_l), \tag{12}$$

где  $d_l, \varphi_l$  – постоянные величины, определяемые из начальных условий:

$$\begin{aligned} \{\Delta q(t)\} &= \{\Delta q(0)\}, \\ \{\Delta \dot{q}(t)\} &= \{\Delta \dot{q}(0)\}. \end{aligned}$$

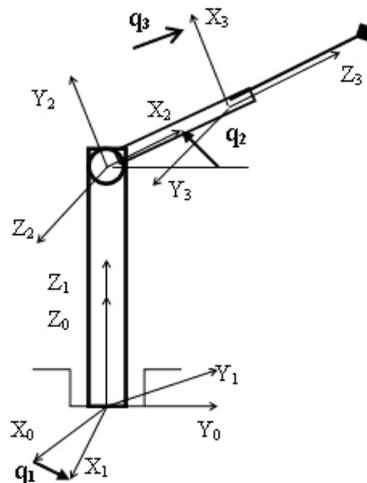


Рисунок 1 – Схема манипулятора

Выполним расчёт собственных частот и форм колебаний на примере манипуляционной системы с тремя степенями свободы представленной на рисунке 1. Первое звено исследуемого манипулятора вращается вокруг вертикальной оси, имеет массу  $m_1$  и моделируется тонкостенной трубкой длиной  $l_1$  и радиусом  $R_1$ . Второе звено массой  $m_2$  вращается вокруг горизонтальной оси и моделируется тонким стержнем длиной  $l_2$ . Третье звено представляет собой сосредоточенную массу  $m_3$  и совершает поступательные перемещения вдоль оси второго звена. Матрица  $[M]$  уравнения свободных колебаний манипуляционной системы около положения статического равновесия (2) будет иметь вид:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 R_1^2 + \left( \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2 \right) \cos^2 q_2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

Тогда определитель, входящий в частотное уравнение (8) примет вид:

$$\begin{vmatrix} c_1 - k^2 \left( m_1 R_1^2 + \left( \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2 \right) \cos^2 q_2 \right) & 0 & 0 \\ 0 & c_2 - k^2 \left( \frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2 \right) & 0 \\ 0 & 0 & c_3 - k^2 m_3 \end{vmatrix} = 0$$

Для решения полученного частотного уравнения можно воспользоваться существующими стандартными компьютерными программами. Или же, рассчитать коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  кубического уравнения (9) и перейдя к неполному виду этого уравнения в форме (10) воспользоваться тригонометрическим методом его решения. [5]

При проведении расчётов параметры модели имели следующие значения:  $m_1=20.0$  кг,  $m_2=10.0$  кг,  $m_3=5.0$  кг,  $R_1=0.05$  м,  $l_1=0.6$  м,  $l_2=0.28$  м,  $l_3=0.28$  м,  $c_1=c_2=1.0e4$  Нм/рад,  $c_3=1.0e6$  Н/м. Выполним расчёт собственных частот исследуемой модели в зависимости от выбора значений её обобщённых координат  $q_i, i=(1,2,3)$ .

Выполним расчёт собственных частот исследуемой модели для положения, задаваемого обобщёнными координатами, имеющими значения:  $q_1=0.0$  рад,  $q_2=\pi/3$  рад,  $q_3=0.0$  м.

Рассмотрим частотную функцию  $f(x) = x^3 + ax^2 + bx + c$ ,  $x = k^2$ , определяемую кубическим уравнением (10), график этой функции представлен на рисунке 2.

На графиках, представленных на рисунках 3 и 4, в увеличенном масштабе выделены диапазоны, содержащие решения частотного уравнения для  $k_1, k_2$  и  $k_3$  соответственно.

Собственные частоты  $k_i, i=(1, 2, 3)$  могут быть рассчитаны путём численного решения частотного уравнения (9).

В данном примере вычислить собственные частоты можно аналитически. Поскольку для исследуемой модели матрица  $[M]$  имеет диагональный вид, переменные в уравнениях свободных колебаний разделены

$$m_{ii} \Delta \ddot{q}_i + c_i \Delta q_i = 0, \quad i = (1, 2, 3).$$

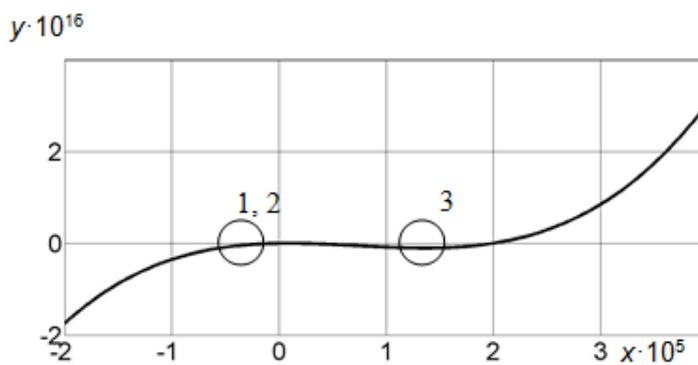


Рисунок 2 – Частотная функция ( $n=3$ )

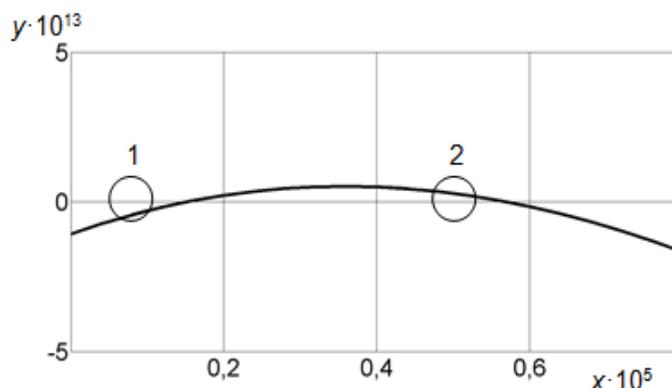


Рисунок 3 – Решения частотного уравнения (1 и 2)

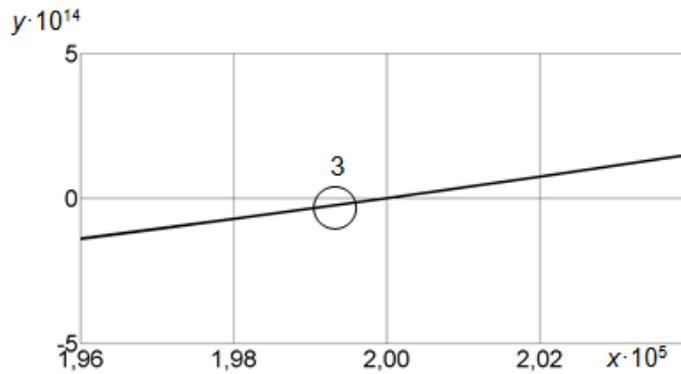


Рисунок 4 – Решение частотного уравнения (3)

Уравнениям свободных колебаний с разделёнными переменными соответствуют частотные уравнения вида

$$c_i - k_i^2 m_{ii} = 0, \quad i = (1, 2, 3).$$

Из частотных уравнений определим собственные частоты:

$$k_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m_{11}}} = \sqrt{\frac{c_1}{m_1 R_1^2 + \left(\frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2\right) \cos^2 q_2}},$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_{22}}} = \sqrt{\frac{c_2}{\frac{4}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (l_2 + l_3 + q_3)^2}},$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{c_3}{m_{33}}} = \sqrt{\frac{c_3}{m_3}}.$$

Решение полученных уравнений для заданных параметров модели даёт значения собственных частот:  $k_1 = 119.24 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_2 = 61.86 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_3 = 447.21 \text{ с}^{-1}$ .

Собственная частота свободных колебаний упругой механической системы является циклической частотой и определяет число колебаний за  $2\pi$  секунд. Удобнее рассматривать собственные частоты, приведенные к виду  $n_i = k_i/2\pi \text{ с}^{-1}$  и отражающие число колебаний в единицу времени. В рассматриваемом примере будем иметь:  $n_1 = 18.98 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_2 = 9.85 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_3 = 71.18 \text{ с}^{-1}$ .

Свободные упругие колебания модели около выбранного положения при начальных условиях  $\Delta q_1(0) = \Delta q_2(0) = 0.0001 \text{ рад}$ ,  $\Delta q_3(0) = 0.0001 \text{ м}$ ,  $\Delta \dot{q}_i(0) = 0, (i = 1, 2, 3)$  будут иметь вид, представленный на рисунке 5. [6]

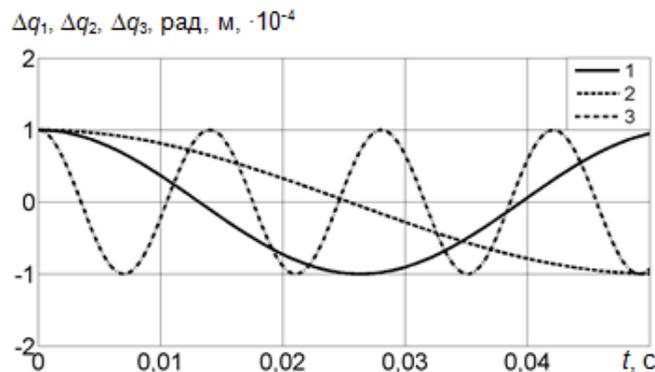


Рисунок 5 – Свободные колебания  $\Delta q_1(t)$ ,  $\Delta q_2(t)$ ,  $\Delta q_3(t)$

Исследуем зависимость собственных частот от обобщённых координат  $q_i$ ,  $i=(1, 2, 3)$ . Как видно из полученных выше аналитических выражений для  $k_i$ ,  $i=(1, 2, 3)$  собственные частоты не зависят от обобщённой координаты  $q_1$ , так как изменение этой координаты меняет положение всей модели целиком, не изменяя её конфигурации от которой зависят инерционные свойства модели.

Собственная частота  $k_1$  зависит от изменения обобщённых координат  $q_2$  и  $q_3$ . Зависимость  $k_1(q_2)$ ,  $q_2=[0, \pi/2]$  при  $q_3=0$  представлена на рисунке 6. [7]

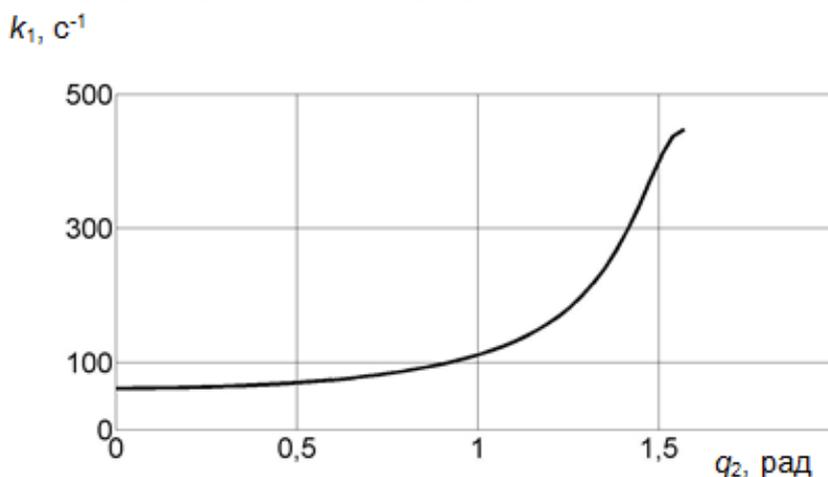


Рисунок 6 – График зависимости  $k_1(q_2)$

Собственная частота  $k_2$  зависит только от обобщённой координаты  $q_3$ . Зависимость  $k_2(q_3)$ ,  $q_3=[0, 0,2]$  при  $q_2=\pi/3$  представлена на рисунке 7.

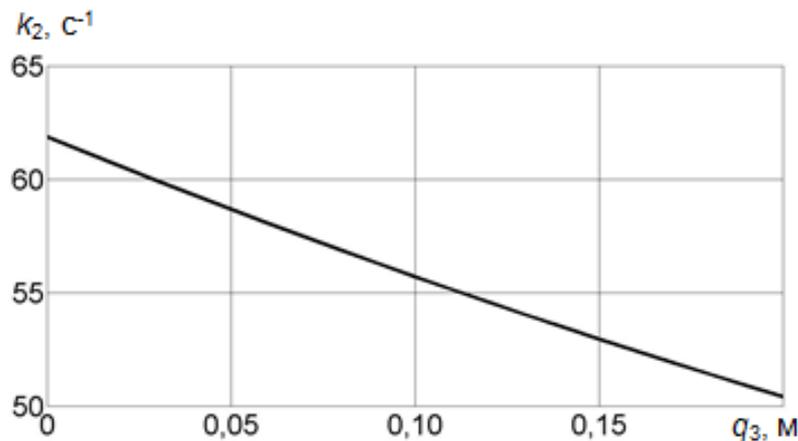


Рисунок 7 – График зависимости  $k_2(q_3)$

Таким образом, проведен всесторонний анализ свободных колебаний выбранной манипуляционной системы с тремя степенями свободы.

Аналогично может быть проведен анализ свободных колебаний манипуляционной системы с тремя степенями свободы произвольной формы. Аналитические решения для собственных частот удаётся получить не всегда, однако всегда можно сформировать частотное уравнение, решение которого может быть получено численно. Расчёт собственных частот манипуляционных систем с числом степеней свободы больше трёх выполняется с использованием специально разработанных компьютерных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крахмалев, О.Н. Исследование малых отклонений от программных движений манипуляционных систем с упругой податливостью, сосредоточенной в сочленениях звеньев [Текст] / О.Н. Крахмалев // Вестник Брянского государственного технического университета, 2011. – №4. – С. 39–46.
2. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов–манипуляторов [Текст] / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 200 с.
3. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных роботов [Текст] / О.Н. Крахмалев // В мире научных открытий, 2012. – №8.1. – С. 51–59.
4. Крахмалев, О.Н. Методика анализа влияния сил инерции на динамику манипуляционных роботов [Текст] / О.Н. Крахмалев // Теория механизмов и машин, 2012. – №20. – Т.10. – С. 41–53.
5. Крахмалев, О.Н. Моделирование динамики манипуляционных систем роботов при малых упругих деформациях и диссипации в шарнирах [Текст] / О.Н. Крахмалев // Современные проблемы теории машин, 2013. – №1. – С. 122–124.
6. Крахмалев, О.Н. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами [Текст] / О.Н. Крахмалев, Л.И. Блейшмидт // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014. – №1. – С. 29–36.
7. Крахмалев, О.Н. Оптимизация законов движения при моделировании динамики манипуляционных роботов [Текст] / О.Н. Крахмалев, Д.М. Медведев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета, 2014. – №1 – С. 45–48.

**Крахмалев Олег Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск  
Доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы»  
E-mail: krakhmalev64@yandex.ru

**Петрешин Дмитрий Иванович**

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск  
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Автоматизированные технологические системы»  
E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

O.N. KRAHMALEV, D.I. PETRESHIN

**NATURAL OSCILLATION FREQUENCIES  
IN HANDLING SYSTEMS WITH ELASTIC LINKS**

*Presents a methodology determining the natural frequencies of free elastic vibrations arising in manipulations systems with three degrees of freedom. An example of the use of the methodology.*

**Keywords:** manipulation systems, elastic vibrations, oscillation frequency.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Krakhmalev, O.N. Issledovaniye malykh otkloneniy ot programmnykh dvizheniy manipulyatsionnykh sistem s uprugoy podatlivost'yu, sosredotochennoy v sochleneniyakh zven'yev [Text] / O.N. Krakhmalev // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011. – №4. – p.p. 39–46.
2. Krakhmalev, O.N. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov–manipulyatorov [Text] / O.N. Krakhmalev. – Bryansk: BGTU, 2012. – 200 p.
3. Krakhmalev, O.N. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki manipulyatsionnykh robotov [Text] / O.N. Krakhmalev // V mire nauchnykh otkrytiy, 2012. – №8.1. – p.p. 51–59.
4. Krakhmalev, O.N. Metodika analiza vliyaniya sil inertsiy na dinamiku manipulyatsionnykh robotov [Text] / O.N. Krakhmalev // Teoriya mekhanizmov i mashin, 2012. – №20. – Т.10. – p.p. 41–53.
5. Krakhmalev, O.N. Modelirovaniye dinamiki manipulyatsionnykh sistem robotov pri malykh uprugikh deformatsiyakh i dissipatsii v sharnirakh [Text] / O.N. Krakhmalev // Sovremennyye problemy teorii mashin, 2013. – №1. – p.p. 122–124.
6. Krakhmalev, O.N. Opredeleniye dinamicheskoy tochnosti manipulyatsionnykh sistem robotov s uprugimi sharnirami [Text] / O.N. Krakhmalev, L.I. Bleyshmidt // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin, 2014. – №1. – p.p. 29–36.
7. Krakhmalev, O.N. Optimizatsiya zakonov dvizheniya pri modelirovanii dinamiki manipulyatsionnykh robotov [Text] / O.N. Krakhmalev, D.M. Medvedev, D.I. Petreshin // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2014. – №1 – p.p. 45–48.

**Krahmalev Oleg Nikolaevich**

VPO "Bryansk State Technical University", Bryansk  
Associate Professor of "automated technological systems"  
E-mail: krakhmalev64@yandex.ru

**Petreshin Dmitri Ivanovich**

VPO "Bryansk State Technical University", Bryansk  
Ph.D., Head. Department "Automated technological systems"  
E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

П.В. ГРЕЧИХИН

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

*Проанализировано применение современных материалов в автомобилестроении с целью увеличения надежности, повышения экономичности и снижения вредного влияния автотранспорта на окружающую среду. Показаны конкретные примеры применения современных материалов в автомобилестроении и эффективность их применения*

**Ключевые слова:** автомобилестроение, современные материалы, алюминиевые сплавы, композитные материалы, полимерные материалы.

Вопросы экономичности, экологичности и надежности производимых автомобилей – это первоочередные вопросы, которые решаются в автомобилестроении. В этой связи изучается и вопрос о применении современных материалов в конструкциях автомобилей

Снижение массы автомобиля влияет на вышеуказанные факторы, особенно с ужесточением требований по экономичности и экологичности. Логично предположить, что снижение массы автомобилей должно происходить путем применения более легких сплавов (алюминиевых и магниевых). По аналогии с авиастроением алюминиевые сплавы, как легкие и прочные материалы, нашли достаточно широкое применение в автомобилестроении. Применение алюминиевых сплавов достигло уровня массового производства, хотя пока только на дорогих моделях (Audi, Jaguar). Это связано с тем, что алюминиевые сплавы более дорогие материалы по сравнению со сталями. В настоящее время успешно освоены многие детали шасси и двигателей из алюминиевых сплавов, а также более легкие компоненты.

Алюминиевые сплавы в решении вопроса о снижении массы автомобилей занимают пока ведущее место. Но уже имеются и более привлекательные материалы с высокими механическими качествами, но еще более легкие. Освоением их в массовом производстве как раз и занимаются ведущие автомобилестроительные фирмы и производители компонентов.

Современные автомобили в силу объективных причин становятся все более сложными и, соответственно, более тяжелыми. Новые легкие конструкционные материалы призваны компенсировать по весу, в том числе, и новые узлы, и системы активной и пассивной безопасности, снижение уровня токсичности, а также постоянное повышение уровня комфорта.

Тем не менее, эксплуатационные характеристики автомобилей постоянно улучшаются, так как двигатели становятся более эффективными, кузова более аэродинамичными, трансмиссии совершенствуются, снижается сопротивление качению шин.

Снижение массы автомобиля – дело не только сложное, но и дорогое, так как связано с необходимостью применения новых, более легких, но достаточно прочных материалов, которые обычно стоят дороже.

Реальное снижение веса может дать только «тотальный» поиск более легких заменителей буквально для всех конструкционных материалов.

Анализ показывает, что новые модели часто все-таки удается сделать легче своих предшественников. Например, масса последнего Ford Fiesta на 25 кг меньше модели предыдущего поколения. Peugeot 508 2.0 весит на 70 кг меньше заменяемой им модели 407 2.0, хотя и превосходит последнюю по габаритам.

Для автомобилей более дорогих и соответственно более обремененных всевозможным оборудованием, снижение веса за счет легких материалов еще важнее. На модели Audi A8 уже применена так называемая пространственная алюминиевая рама (Aluminium Space Frame – ASF). [1]

Компания Jaguar пошла еще дальше: модель XJ (7-ое поколение) чуть ли не вся сделана из алюминия (в сотрудничестве с канадским производителем алюминия – компанией Alcan). Сейчас Jaguar выпускает уже третью «полностью алюминиевую» модель в «большой»

серии (купе и кабриолет XK). Эта технология будет частично использоваться и в следующем Range Rover.

Есть примеры использования алюминия не столь радикально. Например, в автомобилях BMW 7-ой серии и Audi A6 из алюминия делаются лишь отдельные крупные детали, в то время как все другие остаются стальными.

Для электромобилей и гибридов проблема снижения веса является еще более актуальной, так как это связано с возможно допустимым весом аккумуляторной батареи, от которой зависит запас хода.

Снижение массы автомобиля идет также по пути применения композиционных материалов. Композитные материалы – это материалы, которые состоят из нескольких (хотя бы из двух) компонентов, каждый из которых имеет свои индивидуальные характеристики и свойства, не похожие на свойства других компонентов. И при их соединении «объединённое тело» получает совершенно новые свойства.

Самый простой пример: металлическая арматура, гравий, цемент и вода. В соединении эти материалы образуют железобетон, и мы получаем новый материал со свойствами, которыми не обладает ни один отдельно взятый компонент. Древесная стружка, склеенная в единый блок или лист полимерным клеем, так же является композитом. Это всем известная древесно-стружечная плита.

Пузырьки воздуха, замурованные в полистирол, на выходе дают пенополистирол. Алюминиевые волокна, объединённые керамической матрицей, это металлокерамика.

Отдельно взятые стеклянные волокна хрупки. Смола и отвердитель текучи. Но при их соединении стеклянные волокна, объединённые полимерной матрицей клея, превращаются в монолит с поразительными характеристиками по упругости, твёрдости, электро- и теплопроводности. Плотность же этого материала, названного стеклопластиком, втрое меньше. Стеклопластики не поддаются коррозии. При ударе волокна – наполнители композита уплотняются, а габариты детали уменьшаются. При аналогичном ударе металл может порваться или сложиться гармошкой. Происходит это потому, что у стеклопластика степень рассеивания ударной энергии в четыре раза выше, чем у металла. Именно эти свойства делают стеклопластик очень востребованным в автомобильной отрасли.

Стеклопластик очень удобный материал. Он даёт возможность создавать лёгкие, сложные, красивые формы; даёт возможность, изменяя состав входных компонентов, получать конечный материал с заданными характеристиками. Не стоит забывать и такие свойства стеклопластика, как прозрачность для радиоволн, хорошее поглощение шумов и вибраций, прекрасные электроизоляционные характеристики. Немало важно и то, что соотношение стоимости к сложности решения технической задачи тоже идёт в плюсы композитных материалов.

Новые и практически аналогичные свойства имеют и другие композитные материалы, например, углепластики – нити углерода, сплетенные в ткани и скрепленные эпоксидной смолой. Углепластики отличаются высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче.

Композитные материалы всё больше применяются в современном автомобилестроении. Это бамперы и обтекатели, приборные панели, элементы кузова, основания сидений. Не редкость и стеклопластиковое днище автомобиля.

В частности, кузов нового электромобиля BMW i3 в значительной степени выполнен из углепластика. Это дало возможность увеличить вес батареи на 250–350 кг. Фактически кузов делается из синтетического материала, усиленного углеволокном.

Кузов из такого материала на 50% легче стального и на 30% легче алюминиевого. Структурные элементы из нового материала могут легко комбинироваться с алюминиевыми кузовными панелями или металлизироваться.

До сих пор углеволокно применялось для легких спортивных моделей и для очень дорогих автомобилей. Причина проста. Процесс изготовления кузовных и прочих моделей из углепластика или с содержанием углепластика занимает много времени, а потому и дорог.

Однако технология производства композитов совершенствуется, изготовления деталей сокращается по времени. Это дает возможность организовать уже серийный выпуск и соответственно снизить цену.

Все выше сказанное касалось в основном кузовных панелей. Очередь за компонентами и некоторыми деталями шасси.

Компания ZF разработала заднюю подвеску для автомобилей малого класса, где упругим элементом является поперечная однолистовая рессора из синтетического материала, но не усиленная углеволокном. Рессора называется Transverse Composite Leaf Spring и выполняет также функцию направляющего аппарата подвески. Такая подвеска может быть применена и для электромобилей. [2]

Как известно, широчайшее распространение получила подвеска типа Мак Ферсон, состоящая из одного блока, куда входит и пружинная рессора, и амортизатор, и достаточно мощные связующие и фиксирующие элементы. Вот их-то и стремятся облегчить.

Сначала вместо стали применяли алюминий (на сравнительно дорогих моделях). Сейчас делаются попытки использовать композитные материалы, в том числе углеволокно. При этом экономия веса получается довольно значительной.

Так, стойка Мак Ферсон в сборе из углеволокна (для деталей, где это возможно) весит в 2 раза меньше, чем аналогичная стойка с применением алюминия.

В современном автомобилестроении широко используются полимерные материалы. Это материалы, состоящие из большого числа повторяющихся группировок (звеньев) одинакового строения, например поливинилхлорид  $(-CH_2 - CHCl -)_n$ . Таким образом, полимер – это высокомолекулярное соединение, в котором количество мономерных звеньев достаточно велико.

Из полимеров можно делать передние бамперы и багажные крышки, – и многое другое. В будущем ожидается серийное производство полимерных панелей для внешнего корпуса автомобиля и кузовов.

Важным преимуществом использования полимеров в автомобилестроении является комфортность автомобиля, достигаемая значительно лучшими акустическими свойствами, нежели у металлов,

Потребителю скоро станут доступны легкие панорамные крыши, крышки багажного отделения с интегрированными замками и рукоятками и др. Еще одна сфера, где полимеры утвердились безраздельно – внутренняя отделка салона. Здесь доминирующее место занимает технический текстиль. [3]

Применение технического текстиля на данном рынке довольно велико.

Какие факторы обуславливают применение технического текстиля на автомобильном рынке Европы? Прежде всего, возрастающий спрос на подушки безопасности, особенно на боковые подушки и надувные экраны. Это благотворно отражается на потреблении используемых для их производства полиамидных (ПА) волокон.

Отметим также рост потребления автомобильных ковров и обивочных тканей. Не будем сбрасывать со счетов заботу об окружающей среде: растет спрос на волокна наиболее экологически безопасные, причем либо изготовленные в результате рециклинга отходов, либо пригодные для рециклинга по истечении срока эксплуатации автомобиля. Наконец, производители волокон вкладывают значительные средства в развитие сферы производства и потребления новых типов волокон, где технический текстиль для автомобильного рынка занимает одно из ведущих мест.

В настоящее время значительный объем технического текстиля для автомобилей выпускается в виде объемных, гладких тканей или полотен, изготавливаемых, в свою очередь, из ПЭФ текстурированных нитей. Эти материалы (преимущественно в виде окрашенных ворсовых тканей) чаще всего используются в качестве внутренней обивки для потолков автомобилей, а также для дверей, сидений и тормозных колодок АВС. [4]

Рынок шин отличается от других рынков комплектующих изделий для автомобилей своей ориентацией на производителя, а не на конечного потребителя. Самая крупная область

технического текстиля для этих целей – кордная ткань, изготавливаемая из вискозных и реже – арамидных волокон. Положительным образом влияют на развитие рынка шин в Европе новые образцы продукции, остающиеся безопасными после прокола, повышенный спрос на вискозные и арамидные нити.

Таким образом, современный рынок материалов для автомобилестроения – это крупный рынок со сформировавшейся структурой и развитой конкурентоспособностью, на котором сегодня активно действуют от 20 до 30 автомобильных компаний.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Колесник, П.А. Материаловедение на автомобильном транспорте [Текст] / П.А. Колесник, В.С. Кланица. – М.: Академия, 2005. – 318 с.
2. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Текст]/ С.Н. Колесов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 2007. – 535 с.
3. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов[Текст] / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
4. Мотовилин, Г.В. Автомобильные материалы. Справочник [Текст]/ Г.В. Мотовилин, М.А. Масино, О.М. Суворов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1989. – 463 с.

**Гречихин Павел Вадимович**

Мценский филиал Госуниверситета – УНПК,  
студент II курса группы Т–2–70, специальность  
151900.62 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»  
E-mail: pgrechihin@mail.ru

---

P.V. GRECHIKHIN

### **MODERN MATERIALS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY**

*The article deals with the application of modern materials in automobile industry to increase reliability, efficiency and to reduce harmful influence of vehicles on the environment. It gives examples of modern materials usage in the automobile industry and shows the efficiency of their application.*

**Keywords:** *automobile industry, modern materials, aluminum alloys, composite materials, polymeric materials.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Kolesnik, P.A. Materialovedeniye na avtomobil'nom transporte [Text] / P.A. Kolesnik, V.S. Klancitsa. – М.: Akademiya, 2005. – 318 p.
2. Kolesov, S.N. Materialovedeniye i tekhnologiya konstruksionnykh materialov [Text]/ S.N. Kolesov. – 2-ye izd., pererab. i dop.– М.: Vyssh. shk., 2007. – 535 p.
3. Lakhtin, YU.M. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov[Text] / YU.M. Lakhtin. – М.: Metallurgiya, 1983. – 360 p.
4. Motovilin, G.V. Avtomobil'nyye materialy. Spravochnik [Text]/ G.V. Motovilin, M.A. Masino, O.M. Suvorov. – 3-ye izd., pererab. i dop. – М.: Transport, 1989. – 463 p.

**Grechikhin Pavel Vadimovich**

Mtsensk branch of the State University – ESPC,  
student II course of T–2–70, specialty 151900.62  
"Technology, equipment and automation engineering industries"  
E-mail: pgrechihin@mail.ru

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.9.02

Г.М. НАУМОВ, В.Г. ГУСЕВ

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ**

*Приведены сведения о текущем состоянии технического перевооружения отечественных машиностроительных предприятий современным оборудованием с ЧПУ. Рассмотрены вопросы совершенствования подготовки серийного производства путем обоснования поэтапного выбора металлорежущих станков с ЧПУ на основе классификации деталей по топологическим и габаритным свойствам. Разработанная методика учитывает современную тенденцию в оснащении технологических процессов высокоэффективными средствами. Приведены сведения о реальном эффекте от применения предложенной методики на одном из машиностроительных предприятий РФ.*

***Ключевые слова:** станки с ЧПУ, высокоточное изделие, серийное производство, классификация, средств оснащения, технологический процесс.*

Предприятия отечественного машиностроения с середины 19-го века вкладывают большие средства в модернизацию и техническое перевооружение механообрабатывающих производств. В рамках этих мероприятий приобретаются современные обрабатывающие центры с ЧПУ, высокопроизводительный режущий инструмент, иные средства технологического оснащения. Однако, ожидаемый эффект (улучшение качества изделий и сокращение сроков производства) удается достичь далеко не всегда. При этом проблема стоит особо остро на предприятиях с большим парком станков с ЧПУ (50...80 единиц и более).

Одной из основных причин этого факта является отсутствие формализованного подхода к определению наиболее эффективных инструментов производства сложных высокоточных изделий. В большинстве случаев данная задача решается исключительно силами инженеров-технологов, и, как следствие этого, эффективность решения полностью зависит от индивидуального подхода и профессионального опыта.

В связи с вышесказанным ставится задача разработки формализованного подхода к выбору металлорежущего оборудования с ЧПУ для производства сложных высокоточных изделий. Под термином «высокоточное изделие» подразумевается деталь, изготавливаемая на станке с ЧПУ (не менее 70% операций по техпроцессу) и имеющая не менее 5-8 контролируемых размеров с предельными отклонениями  $\pm 0,02$  мм.

На первом этапе решения задачи разрабатывается классификация производимых на предприятии изделий по топологическим признакам: габаритные размеры, геометрическая форма, предельные отклонения формы и взаимного расположения поверхностей; иные признаки, прямым образом влияющие на процесс обработки на станках с ЧПУ. При этом универсальный подход к классификации изделий (модульная технология проф. Б. М. Базрова) не всегда может эффективно использоваться для решения данной задачи в силу большой номенклатуры современных предприятий и высокой степени диверсификации основного производства.

В качестве примера на рисунке 1 приведена двухуровневая классификация изделия «Пресс-форма» для литья под давлением. На первом уровне изделия классифицируются по первичным топологическим признакам, на втором – по качеству точности размеров, параметрам микронеровностей рабочих поверхностей, отклонению формы и взаимному расположению поверхностей.

Необходимо учитывать, что при увеличении номенклатуры производимых изделий и парка оборудования, степень детализации классификационной структуры необходимо увеличивать.

На втором этапе формируется перечень металлорежущего оборудования с ЧПУ, применяемого для обработки изделий. При этом формируются функциональные группы оборудования с ограничительными характеристиками в виде количества одновременно управляемых осей координат станка и максимальных размеров обрабатываемых изделий.

Для металлорежущих станков фрезерной группы максимальные размеры обрабатываемых изделий определяются как:

$$A_{max} = Z_{lim} - (H_t + H_p + Z_s),$$

$$B_{max} = X_{lim} - h_1,$$

$$C_{max} = Y_{lim} - h_2,$$

где  $A_{max}, B_{max}, C_{max}$  – соответственно максимальная высота, длина и ширина заготовки;  $X_{lim}, Y_{lim}, Z_{lim}$  – предельные перемещения режущего инструмента по оси X, Y, Z;  $H_t$  – величина вылета режущего инструмента;  $H_p$  – высота системы инструментального оснащения;  $Z_s$  – величина безопасного расстояния перебега инструмента;  $h_1$  и  $h_2$  – величина безопасного расстояния для исключения столкновения рабочих органов станка с концевыми ограничителями по осям X и Y.



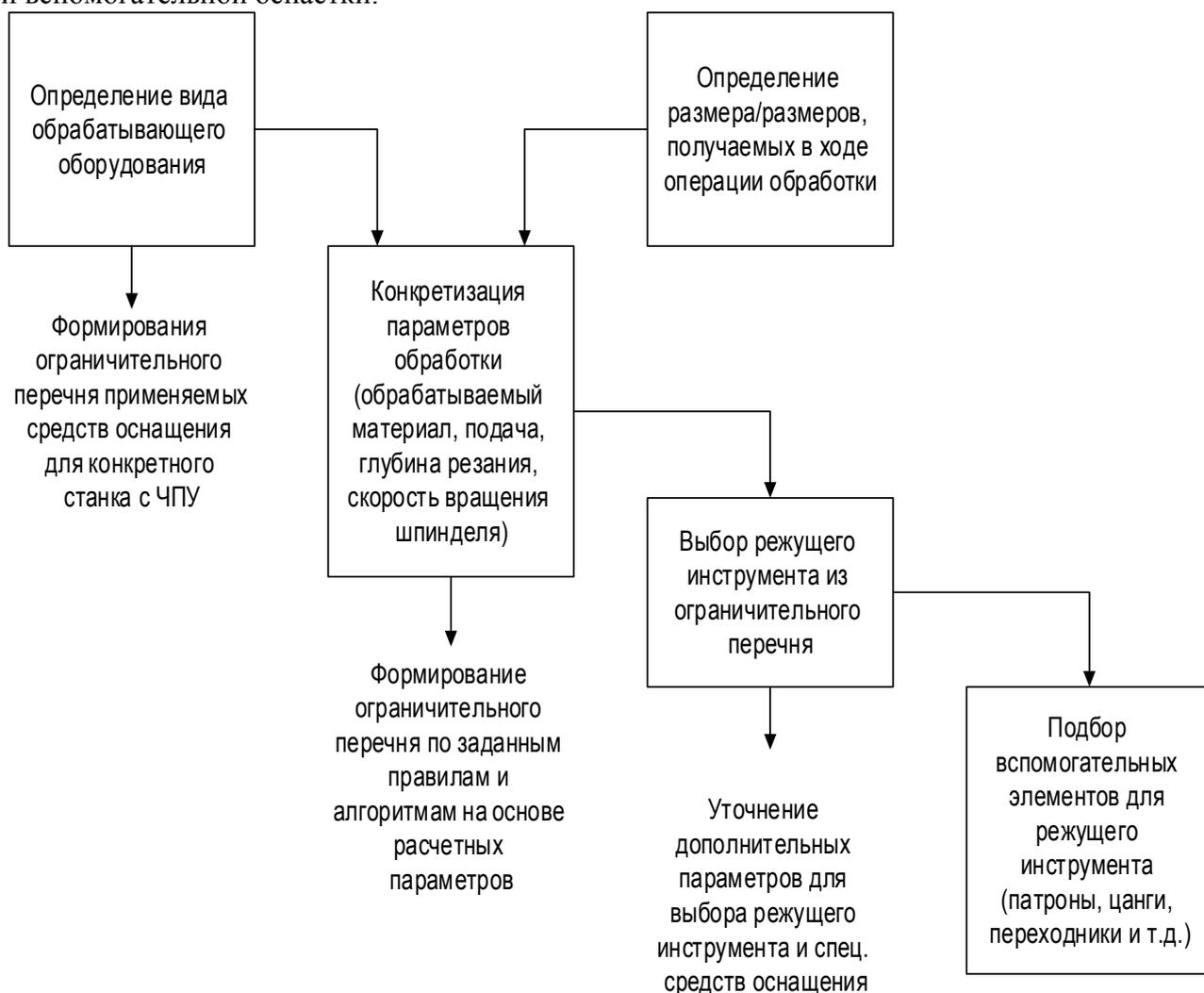
Рисунок 1 – Двухуровневая классификация изделия «Пресс-форма»

Значения  $X_{lim}, Y_{lim}$  и  $Z_{lim}$  определяются из справочных данных станка. Значения  $H_t$  и  $H_p$  определяются, исходя из рекомендаций производителя режущих инструментов и

средств оснащения, но в большинстве случаев значение данных параметров будет уникальным (в зависимости от обрабатываемого материала, максимальной глубины обработки и диаметра режущего инструмента). Значение  $Z_s$  может варьироваться в пределах (75...150) % от величины  $(H_c + H_p)$ . Безопасные расстояния  $h_1$  и  $h_2$  для исключения столкновения рабочих органов станка с концевыми ограничителями по осям X и Y могут быть рассчитаны исходя из (5...7) % от величины предельного перемещения по соответствующим осям.

На третьем этапе определяются ограничительные перечни применяемых средств оснащения: режущих инструментов, технологической оснастки. Традиционно применяемые схемы выбора режущего инструмента с использованием исключительно каталогов поставщиков режущего инструмента не учитывают особенности оборудования, используемого в процессе производства изделий. В этой связи предлагается применение функциональной схемы выбора режущего инструмента и вспомогательных средств оснащения, учитывающей результаты расчетно-аналитических данных предыдущих этапов.

Применение этой схемы в условиях реального производства доказало её целесообразность и эффективность. Так, например, для сложных высокоточных изделий фрезерной группы количество ошибок при разработке технологических процессов механообработки снизилось на 30...40%. Данный подход позволяет сократить сроки технологической подготовки производства сложных изделий и внедрения их в серийное производство. Помимо этого, данная методика позволяет провести на предприятии унификацию применяемых средств оснащения, снизив в 1.5...2,0 раза количество применяемых позиций режущего инструмента и вспомогательной оснастки.



*Рисунок 2 – Схема выбора оборудования с ЧПУ и режущего инструмента*

Следует отметить, что предложенная схема выбора оборудования (рис. 2) для производства высокоточных изделий может быть реализована как при помощи расчетно-аналитических методов, так и с применением современных средств автоматизации (CAD/CAM-систем и систем автоматизации технологической подготовки производства).

**Наумов Георгий Михайлович**

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых  
аспирант 3-го года обучения кафедры «Технология машиностроения»  
Сот. тел. 8-920-924-34-00. раб. тел. (4922)479-924  
E-mail: enaumov@mail.ru

**Гусев Владимир Григорьевич**

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
600015, г. Владимир, проспект Ленина, д.35А, кв. 10  
моб. тел. 8-900-473-89-32; раб. тел. (4922)479-924.  
E-mail: prof\_gusev@mail.ru

---

G.M. NAUMOV, V.G. GUSEV

**PRODUCTION PREPARATION IMPROVEMENT OF HIGH-PRECISION PRODUCTS BY THE REASONABLE CHOICING OF NUMERICAL CONTROL EQUIPMENT**

*Current state data of machine-building enterprises rearmament by the modern numerical control machines are given. Improvement questions of a serial production preparation by the way of a stage-by-stage choice of numerical control metal-cutting machines on the details classification base by topological and dimensional properties are considered. The developed technique considers a modern trend in technological processes suppling by high-efficiency means. Real effect data from the offered technique application are given at one of the Russian Federation machine-building enterprises.*

**Keywords:** numerical control machines, high-precision products, serial production, classification, equipping process means, technological process.

**Naumov Georgy Mikhailovich**

Vladimir state University. A.G. and N.G. Stretovych  
student of the 3rd year of study of the Department "Technology of mechanical engineering"  
SOT. phone 8-920-924-34-00 RAB. phone (4922)479-924  
E-mail: enaumov@mail.ru

**Gusev Vladimir Grigorievich**

Vladimir state University named after Alexander G. and Nicholas G. Stretovych  
doctor of technical Sciences, Professor of the Department "Technology of mechanical engineering"  
600015, , Vladimir, Lenin Avenue, da, square 10  
mob. phone 8-900-473-89-32; a servant. phone (4922)479-924.  
E-mail: prof\_gusev@mail.ru

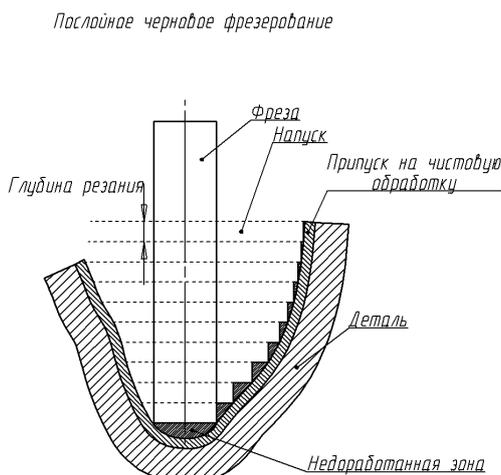
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОГНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Рассматривается проблема повышения производительности объемного 3D фрезерования зон, оставшихся необработанными после полустого фрезерования.*

**Ключевые слова:** объемное фрезерование, необработанные зоны, производительность.

Объемное фрезерование один из широко распространенных способов обработки поверхностей со сложными формами. Конкуренция между производителями машиностроительной отрасли ведет к постоянному повышению производительности и снижению стоимости продукции. Достигается это различными способами: назначением рациональных режимов резания [1] и применением усложненных траекторий движений инструмента [2].

Фрезерование, в отличие от других методов механической обработки, характеризуется непостоянством геометрических параметров зоны резания. Например, при черновой объемной обработке, которая производится цилиндрическими концевыми фрезами, вблизи дна формируется необработанная зона (рис.1). Чистовая обработка подобных поверхностей производится сферическими фрезами.



**Рисунок 1 - Схема послойного чернового фрезерования**

Непостоянство геометрии зоны резания приводит к изменениям усилий резания, что вызывает непостоянство параметров точности обработки, и даже может стать причиной поломки инструмента.

В связи с этим, задача по назначению оптимальных значений усилий резания на каждом участке обрабатываемой поверхности, зависящих от геометрии зоны резания является актуальной.

Наиболее полное аналитическое описание изменений усилий резания было представлено в работе [3], в виде зависимостей:

$$dP_z^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_0} \frac{a}{\sin \beta_1} \cos \beta R d\varphi + 0,252 \mu \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_0} I_3 R d\varphi; \quad (1)$$

$$dP_x^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_0} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \cos \varphi R d\varphi + 0,252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_0} I_3 \cos \varphi R d\varphi; \quad (2)$$

$$dP_y^\Sigma = \sum_{n=1}^Z 1,15 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \sin \varphi R d\varphi + 0,252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_3 \sin \varphi R d\varphi ; \quad (3)$$

где,  $Z$ - количество зубьев фрезы;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений при резании;  $a$ - толщина срезаемого слоя;  $\beta_1$ - угол наклона плоскости сдвига стружки;  $\beta$  – угол между линией среза и направлением равнодействующей силы  $R_p$ ;  $\mu$  - коэффициент трения;  $\varphi$  – угол профиля фрезы;  $R$ - радиус фрезы;  $l_3$ - степень износа зуба;  $\varphi_g$  – угол между осью фрезы и верхней точкой пересечения лезвия с заготовкой;  $\varphi_n$  – угол между осью фрезы и нижней точкой пересечения лезвия с заготовкой.

Выражения (1-3) устанавливают связь между параметрами и усилиями резания при обработке сферическими фрезами, но так как интегральная форма неприемлема для использования на стойках ЧПУ, то возникает необходимость в преобразовании данных выражений и приведения их к упрощенной форме.

Толщина срезаемого слоя зависит от глубины резания (рис.2) и рассчитывается по выражению:

$$a_{наиб.} = F_{зуб.} \sin \Psi = 2F_{зуб.} \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}} \approx 2F_{зуб.} \sqrt{\frac{t}{D}} ; \quad (4)$$

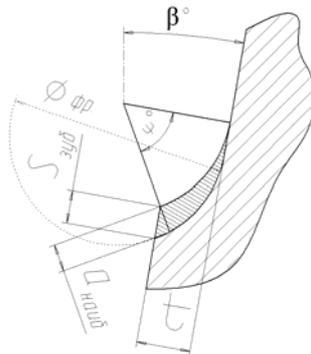


Рисунок 2 - Расчетная схема сечения срезаемого слоя

где  $t$  – глубина резания, при обработке стенок, а при обработке ранее необработанных участков рассчитывается по выражениям [4,5]:

$$H_{1нар.} = \frac{(R_{фр.} + T)^2}{2,2R_{фр.} - \Delta T} + T^2 ; \quad H_{1окр.} = \frac{R_{фр.} \cdot \operatorname{tg} \left( a \sin \frac{R_{фр.}}{R_{нов.}} \right)}{2} + T ; \quad (5)$$

где  $R_{фр.}$  – радиус фрезы;

$T$ - величина предварительно заданного припуска;

$\Delta T$ - заданная точность обработки;

$R_{нов.}$  – радиус участка обрабатываемой поверхности [6].

Угол наклона плоскости сдвига стружки и угол между линией среза и направлением равнодействующей силы определяются по выражениям [3]:

$$\beta_1 = \operatorname{atg} \left( \frac{\cos \gamma_\phi}{K_a - \sin \gamma_\phi} \right), \quad \beta = \frac{50 - \beta_1}{0,8} ; \quad (6)$$

где  $\gamma_\phi$  - передний угол инструмента, для сферических фрез колеблется в пределах от  $5^\circ$  до  $10^\circ \max$ ;  $K_a$ - коэффициент утолщения стружки, рассчитывается по выражению [7,8]:

$$K_{a \sin} = \sin \left( \frac{\pi D_{\text{эфф}} \cdot N}{1000} (65,79 \cdot F_{\text{зуб}}^{2,0654}) \right) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1; \quad (7)$$

Подстановка параметров подачи в диапазоне от  $F = 0,001$  мм/зуб. до  $F = 0,2$  мм/зуб на скоростях от  $V = 1000$  м/мин до  $V = 0,1$  м/мин. числовые значения выражений:

$$\sin \beta_1 = \sin \left( \arctg \left( \frac{\cos \gamma_{\phi}}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{\text{зуб}}^{2,0654}))) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1) - \sin \gamma_{\phi}} \right) \right); \quad (8)$$

$$\cos \beta = \cos \left( \frac{50 - \arctg \left( \frac{\cos \gamma_{\phi}}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{\text{зуб}}^{2,0654}))) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1) - \sin \gamma_{\phi}} \right)}{0,8} \right); \quad (9)$$

находятся в пределах  $\sin \beta_1 = (0,54-0,58)$ ,  $\cos \beta = (0,94-0,96)$ .

Расчет угла контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью на участке с постоянным припуском (обработка стенки) можно вывести по схеме (рисунок 3).

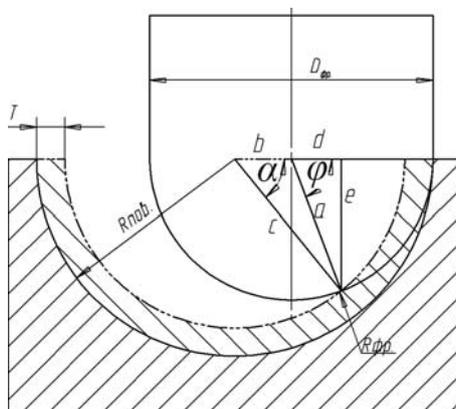


Рисунок 3 - Схема определения угла контакта режущей кромки

$$\alpha = \arccos \left( \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right); \quad e = c \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right) \right); \quad (10)$$

Так как,  $a = R_{\text{фр}}$ ;  $b = R_{\text{нов}} - R_{\text{фр}} = R_{\text{мп}}$ ;  $c = R_{\text{нов}} - T = R_{\text{мп}} + R_{\text{фр}} - T$ .

Тогда:

$$\begin{aligned} \varphi &= a \sin \frac{(R_{\text{нов}} - T) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{(R_{\text{нов}} - R_{\text{фр}})^2 + (R_{\text{нов}} - T)^2 - R_{\text{фр}}^2}{2R_{\text{мп}}(R_{\text{мп}} + R_{\text{фр}} - T)} \right) \right)}{R_{\text{фр}}} = \\ &= a \sin \frac{(R_{\text{мп}} + R_{\text{фр}} - T) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R_{\text{мп}}^2 + (R_{\text{мп}} + R_{\text{фр}} - T)^2 - R_{\text{фр}}^2}{2R_{\text{мп}}(R_{\text{мп}} + R_{\text{фр}} - T)} \right) \right)}{R_{\text{фр}}}; \quad (11) \end{aligned}$$

Графическое представление выражения (11) представляет собой гиперболу с уравнением:

$$\varphi_i = A \cdot R_{\text{мп},i}^{-0,8} + B; \quad (12)$$

Так как

$$\varphi_{i+1} = A \cdot R_{mp.i+1}^{-0,8} + B; \quad \varphi_{i+2} = A \cdot R_{mp.i+2}^{-0,8} + B;$$

Тогда

$$A = \frac{\varphi_{i+2} - \varphi_{i+1}}{R_{mp.i+2}^{-0,8} - R_{mp.i+1}^{-0,8}}, \quad B = \varphi_{i+1} - A \cdot R_{mp.i+1}^{-0,8}; \quad (13)$$

где  $R_{mp.i}$  – радиус траектории на любом участке.  
 $R_{mp.i+1}, R_{mp.i+2}$  – рассчитываются по выражениям:

$$R_{mp.i+1} = 0,5R_{фр.}; \quad R_{mp.i+2} = 0,6R_{фр.}; \quad (14)$$

Припуск на чистовую обработку задается в пределах:

$$t(\%) = (0,01...0,2) \cdot (R_{фр.})$$

Значения параметров  $\varphi_{i+1}$  и  $\varphi_{i+2}$  для различных значений  $t(\%)$  представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Таблица значений для определения эмпирических коэффициентов А, В

	Припуск % от радиуса инструмента.									
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$\varphi_{i+1}$	14,05	19,88	24,37	28,16	31,51	34,55	37,35	39,97	42,43	44,77
$\varphi_{i+2}$	13,24	18,74	22,96	26,53	29,69	32,54	35,17	37,63	39,94	42,13
	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
$\varphi_{i+1}$	46,99	49,13	51,18	53,16	55,08	56,93	58,74	60,5	62,22	63,9
$\varphi_{i+2}$	44,21	46,21	48,13	49,98	51,78	53,51	55,2	56,84	58,44	60

Выражение 12 позволяет с высокой точностью определять угол контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью, но при врезании инструмента в ранее необработанную зону (рисунок 4), кроме кромки  $CF$  дополнительно вступает в работу участок кромки  $EC$ .

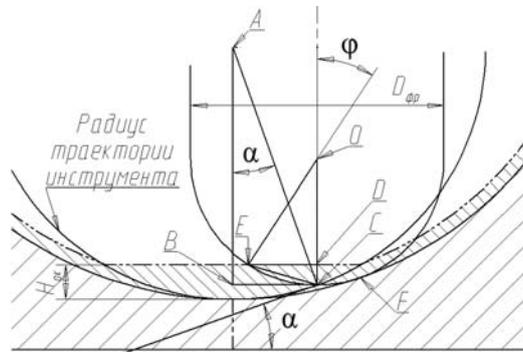


Рисунок 4 - Схема определения угла контакта режущей кромки в ранее необработанной зоне

Учитывая, что

$$AB = AC \cos \alpha = R_{mp} \cos \alpha \Rightarrow DC = H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha); \quad (15)$$

и поскольку

$$D_{эфф.} = 2\sqrt{T_{\Sigma}(D_{фр.} - T_{\Sigma})}, \text{ а } DC = T_{\Sigma},$$

получаем

$$ED = \sqrt{(H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))(D_{фр.} - H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))}; \quad (16)$$

$$\varphi = a \sin \frac{ED}{EO} \Rightarrow$$

$$\varphi = a \sin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))(2R_{фр.} - H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))}}{R_{фр.}}; \quad (17)$$

Учитывая вышеизложенное, выражения (1-3) примут следующий вид:

1) Для обработки стенки на первом проходе (обработка паза):

$$dP_z^{\Sigma} = 4\sigma_i F_{зуб.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фр.}}} R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) + 0,252\sigma_i I_3 R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) \cdot$$

$$\cdot \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{зуб.}^{2,0654}))) \cdot (K_{amax} - 1) + 1} \right) ; \quad (18)$$

$$dP_x^{\Sigma} = 1,32\sigma_i F_{зуб.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фр.}}} R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) \cos \varphi + 0,252\sigma_i I_3 R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) \cos \varphi \cdot$$

$$\cdot \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{зуб.}^{2,0654}))) \cdot (K_{amax} - 1) + 1} \right) ; \quad (19)$$

$$dP_y^{\Sigma} = 1,32\sigma_i F_{зуб.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фр.}}} R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) \sin \varphi + 0,252\sigma_i I_3 R \cdot (AR_{мп.}^{-0,8} + B) \sin \varphi \cdot$$

$$\cdot \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{зуб.}^{2,0654}))) \cdot (K_{amax} - 1) + 1} \right) ; \quad (20)$$

где  $\sin \beta = 0,32$ .

2) Для ранее необработанной зоны на первом проходе (обработка паза):

$$dP_z^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z 4\sigma_i F_{зуб.} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))(2R_{фр.} - H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))}}{R_{фр.}} \right) +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))(2R_{фр.} - H_{ок} - (R_{мп} - R_{мп} \cos \alpha))}}{R_{фр.}} \right) \cdot ; \quad (21)$$

$$\cdot \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{(\sin(V(65,79 \cdot F_{зуб.}^{2,0654}))) \cdot (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

$$dP_x^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,32\sigma_i F_{зуб} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) \cos \varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) \cos \varphi \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

$$dP_y^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,32\sigma_i F_{зуб} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) \sin \varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( a \sin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) \sin \varphi \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

3) Для обработки стенки на втором и последующих проходах:

$$dP_z^\Sigma = 4\sigma_i l_{np.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фп.}}} R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) + 0,252\sigma_i I_3 R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

$$dP_x^\Sigma = 1,32\sigma_i l_{np.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фп.}}} R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) \cos \varphi + 0,252\sigma_i I_3 R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) \cos \varphi \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

$$dP_y^\Sigma = 1,32\sigma_i l_{np.} \sqrt{\frac{2T}{R_{фп.}}} R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) \sin \varphi + 0,252\sigma_i I_3 R \bullet (AR_{mp.}^{-0,8} + B) \sin \varphi \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

4) Для ранее необработанной зоны на втором и последующих проходах:

$$dP_z^\Sigma = 4\sigma_i l_{np.} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{фп.} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{фп.}} \right) \bullet$$

$$\bullet \operatorname{tg} \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \cdot F_{зуб}^{2,0654})) \right) \bullet (K_{amax} - 1) + 1} \right)$$

$$dP_x^\Sigma = 1,32\sigma_i l_{np} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{\phi p} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{\phi p}} \right) \cos \varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{\phi p} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{\phi p}} \right) \cos \varphi \bullet \quad ; (28)$$

$$\bullet \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \bullet F_{зуб}^{2,0654})) \bullet (K_{a \max} - 1) + 1 \right)} \right)$$

$$dP_y^\Sigma = 1,32\sigma_i l_{np} R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{\phi p} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{\phi p}} \right) \sin \varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i I_3 R \cdot \left( \arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))(2R_{\phi p} - H_{ок} - (R_{mp} - R_{mp} \cos \alpha))}}{R_{\phi p}} \right) \sin \varphi \bullet \quad . (29)$$

$$\bullet \left( 80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{\left( \sin(V(65,79 \bullet F_{зуб}^{2,0654})) \bullet (K_{a \max} - 1) + 1 \right)} \right)$$

#### Выводы.

1. Полученные выражения позволяют определять изменения усилий резания в широком диапазоне подач и скоростей, при меняющихся геометрических параметрах зоны резания.

2. Упрощенная форма полученных математических зависимостей приемлема для программного управления режимами резания при чистовом фрезеровании на станках с ЧПУ, а их расчетные величины отличаются от рассчитанных по выражениям (1-3) не более, чем на 5%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбросимов, С.К. Исследование динамики процесса резания при выходе зуба из зоны обработки при фрезеровании / С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. - № 1. – С. 29–34.
2. Амбросимов С.К., Вепренцев О.Ю., Косенков М.А., Большаков А.Н. Исследование параметров срезаемого слоя при винтовом фрезеровании со спиралевидной траекторией // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011.-№ 6-3.- С.3-12
3. Батуев В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском. Автореферат дис. ... канд. техн. наук / В.В. Батуев.- Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2007. С. 9.
4. Козлов А.М. Повышение производительности объемного фрезерования необработанных зон. / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Сб. науч. статей V Междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение – основа технологического развития России». Курск, 22-24 мая 2013 г. 2013, С. 307–310.
5. Козлов А.М. Обеспечение точности объемного фрезерования на станках с ЧПУ при наличии ранее необработанных зон / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Матер. областного профильного семинара «Школа молодых ученых по проблемам технических наук». 26-27 сентября 2013г. Липецк, 2013.- С. 82–86.
6. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Автоматическое определение радиуса дуги при объемном фрезеровании на станках с ЧПУ // Научно-технологические проблемы машиностроения. - 2013. - № 11.- С. 14–18.
7. Козлов А.М. Расчет коэффициента усадки стружки при чистовой обработке сферическими фрезами. / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Материалы III международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии. Москва. 23-24 января 2014 г. - С. 89-94.
8. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ// Научно-технологические проблемы машиностроения. - 2014. - № 6. - С. 39–43.

**Малютин Геннадий Евгеньевич**

Липецкий государственный технический университет,  
аспирант кафедры «Технология машиностроения», инженер-конструктор  
Тел.: +7 950 805 48 60  
E-mail: malgena@rambler.ru

G.E. MALYUTIN

## DEFINITION OF CUTTING FORCES IN FINISHING SCULPTED CONCAVE SURFACE COMPLEX SHAPE SPHERICAL MILLS ON CNC

*The problem of performance milling zones surround left untreated after Finishing milling.*

**Key words:** volume milling, rough area, performance.

### BIBLIOGRAPHY

1. Ambrosimov, S.K. Issledovanie dinamiki processa rezanija pri vyhode zuba iz zony obrabotki pri frezerovanii / S.K. Ambrosimov, A.N. Bol'shakov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i teh-nologii. – 2010. - № 1. – S. 29–34.
2. Ambrosimov S.K., Veprencev O.Ju., Kosenkov M.A., Bol'shakov A.N. Issledovanie parametrov sreaemogo sloja pri vintovom frezerovanii so spiralevidnoj traektoriej // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2011.-№6-3.- S.3-12
3. Batuev V.V. Povyshenie proizvoditel'nosti i tochnosti chistovogo frezerovanija prostranstvenno-slozhnyh poverhnostej so stupenchatym pripuskom. Avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk / V.V. Batuev.- Chelja-binsk: Juzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet , 2007. S. 9.
4. Kozlov A.M. Povyshenie proizvoditel'nosti ob#emnogo frezerovanija neobrabotannyh zon. / A.M. Kozlov, G.E. Maljutin // Sb. nauch. statej V Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Mashinostroenie – osnova tehnolo-gicheskogo razvitija Rossii». Kursk, 22-24 maja 2013 g. 2013, S. 307–310.
5. Kozlov A.M. Obespechenie tochnosti ob#emnogo frezerovanija na stankah s ChPU pri nalichii ranee ne-obrabotannyh zon / A.M. Kozlov, G.E. Maljutin // Mater. oblastnogo profil'nogo seminaru «Shkola molo-dyh uchenyh po problemam tehniceskikh nauk». 26-27 sentjabrja 2013g. Lipeck, 2013.- S. 82–86.
6. Kozlov A.M., Maljutin G.E. Avtomaticheskoe opredelenie radiusa dugi pri ob#emnom frezerovanii na stankah s ChPU // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. - 2013. - № 11.- S. 14–18.
7. Kozlov A.M. Raschet kojefficienta usadki struzhki pri chistovoj obrabotke sfericheskimi frezami. / A.M. Kozlov, G.E. Maljutin // Materialy III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii «21 vek: fun-damental'naja nauka i tehnologii. Moskva. 23-24 janvarja 2014 g. - S. 89-94.
8. Kozlov A.M., Maljutin G.E. Povyshenie jeffektivnosti chistovogo ob#emnogo 3D frezerovanija na stankah s ChPU// Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. - 2014. - № 6. - S. 39–43.

**Malyutin Gennadiy Evgenevich**

Lipetsk State Technical University  
Graduate student of «Mechanical Engineering», Engineer  
Тел.: +7 950 805 48 60  
E-mail: malgena@rambler.ru

УДК: 621.002.539.3 (075.8)

А.П. СЕРГИЕВ, А.В. МАКАРОВ, А.А. ПРОСКУРИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ И РЕВЕРСИВНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ СРЕЗА ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ

*В статье представлено постадийное исследование реверсивной деформации на предмет возникновения трещин и образования заусенцев.*

*Ключевые слова:* структура, травление, деформация, реверсивное нагружение, заусенцы.

Заусенцы, образующиеся при холодной листовой вырубке, представляют собой разновидность выступающих дефектов кромок и являются одним из показателей качества. Эти дефекты, как правило, нежелательное следствие технологического процесса производства, отрицательно сказывающееся на всех его этапах. В этой связи в технологический процесс изготовления деталей вводят дополнительные операции.

Чтобы избежать введения дополнительных операций в технологический процесс, используют способы и методы чистовой штамповки. Одним из таких методов является реверсивная вырубка.

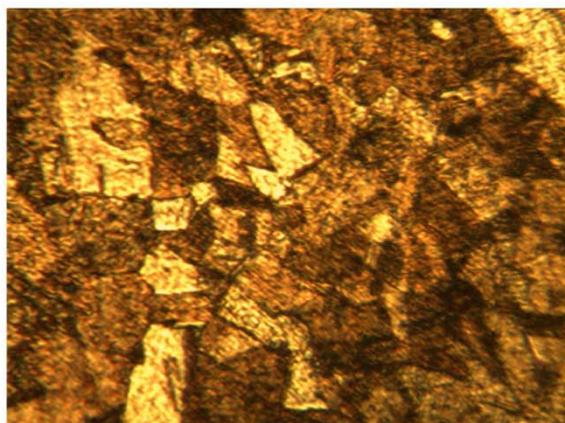
Существуют патенты на изобретения, в которых описывается реверсивная вырубка за два нагружения, т.е. первичная деформация и окончательная вырубка. В результате проведения анализа источников, связанных с реверсивной вырубкой, не было обнаружено подтверждения того, что 2 является оптимальным числом нагружений, поэтому было решено провести эксперименты и рассмотреть как деформируются зерна меди М1 на заготовке ленты толщиной 1,5 мм и шириной 18 мм, при реверсивном нагружении.

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой кривошипный пресс и вырубной штамп, на котором регулируются величина первичной и реверсивной деформации. Описание установки представлено в работе [1].

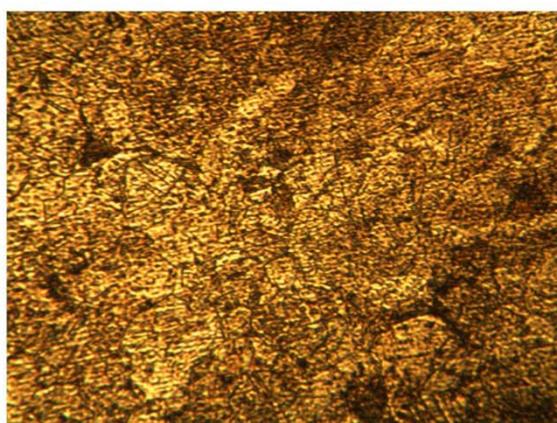
Результаты экспериментов оценивались посредством системы MAPS-2 с компьютерным управлением. Для проведения оценки, полученные образцы были запрессованы в смолу ClaroFast (смола на основе акрила прозрачного) и диаметрально разрезаны, после чего производилось травление с целью выявления структуры металла. Для травления было опробовано четыре разных травителя: №3 [25 HCl; 8г FeCl<sub>3</sub>; 100 мл H<sub>2</sub>O]; №11 [5 г FeCl<sub>3</sub>; 30 мл HCl; 100 мл H<sub>2</sub>O]; №13 [50 мл 3%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 50 мл NH<sub>3</sub>]; №17 [3г AgNO<sub>3</sub>; 100 мл H<sub>2</sub>O] (Рисунок 1). Наиболее подходящим оказался травитель №3. Солянокислые растворы хлорного железа относятся к самым распространенным реактивам. Их применяют как для травления меди, так и её сплавов, но в зависимости от способа травления они оказывают различное действие. Нами было применено травление погружением для выявления поверхности зёрен, рассматриваемых при малых увеличениях. При применении спиртового раствора чётче проявляется периодическое отражение. Продолжительность травления составляла 30 секунд [2].

После травления результаты были зафиксированы в определенном масштабе, позволяющем сделать вывод об изменении расположения зерен в процессе реверсивной деформации.

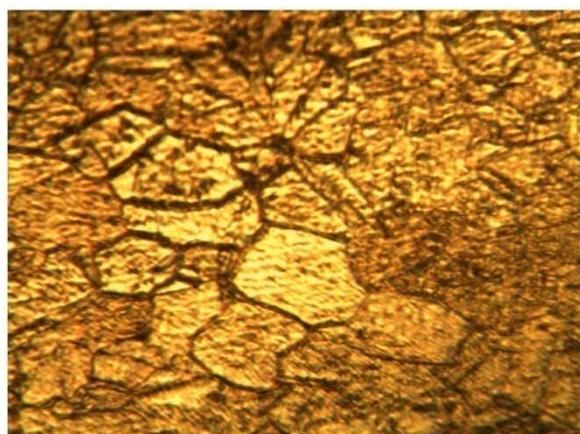
Предварительные исследования соотношения первичной и реверсивной деформации позволили установить их оптимальные соотношение для различных материалов [1].



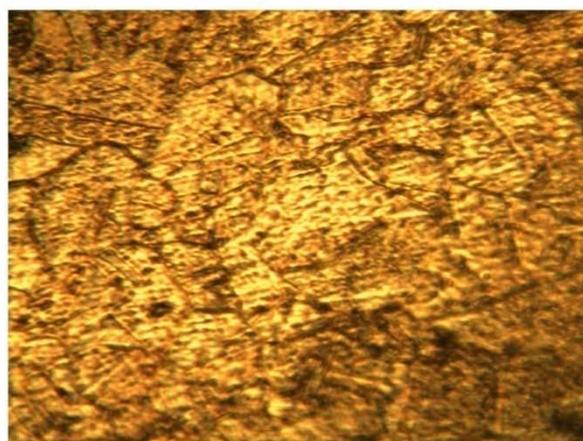
а)



б)



в)



з)

**Рисунок 1 – Медь М1 после травления реактивами**

*а – травитель №3 [25 HCl; 8г FeCl<sub>3</sub>; 100 мл H<sub>2</sub>O]; б – травитель №11 [5 г FeCl<sub>3</sub>; 30 мл HCl; 100 мл H<sub>2</sub>O];  
в – травитель №13 [50 мл 3%-ного H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 50 мл NH<sub>3</sub>]; з – травитель №17 [3г AgNO<sub>3</sub>; 100 мл H<sub>2</sub>O]*

Постадийное исследование первичного, реверсивного деформирования и окончательной вырубки на примере вырубке шайбы из меди М1 толщиной 1,5 мм с внутренним диаметром 8 мм и наружным 15 мм при оптимальных соотношениях первичной и реверсивной деформации позволили проследить характер деформации зерен и процесса зарождения трещин в зоне деформации.

На рисунке 2, а представлен образец после первичной деформации на величину 30% от толщины заготовки. При первичной деформации зерна вытягиваются и поворачиваются в направлении деформации.

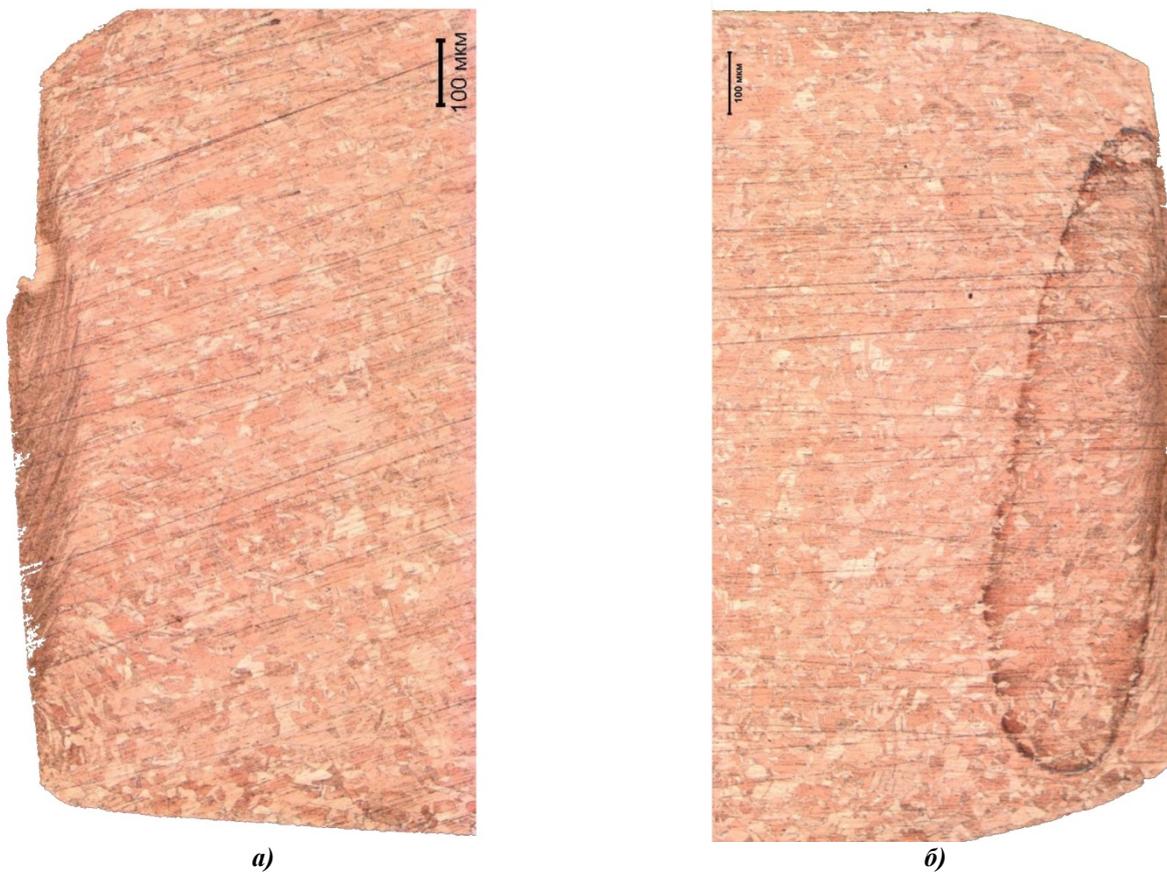
На рисунке 2, б представлен тот же образец после реверсивной деформации на величину 40%. На котором видно, что зерна вытянулись и развернулись в направлении реверсивной деформации.

На рисунке 3а представлена поверхность отверстия шайбы, а на рисунке 3б – наружная поверхность после окончательной вырубке. Которая свидетельствует о полном отсутствии заусенцев, как по внутренней, так и по наружной поверхностям вырубке.

Для достижения результатов, полученных в ходе представленного исследования, в производстве был разработан технологический процесс реверсивной вырубке листовых деталей.



а) *Рисунок 2 – Образец в восьмикратном увеличении после приложения*  
б) *первичной деформации; б – реверсивной деформации*



а) *Рисунок 3 – Образец в восьмикратном увеличении после окончательной вырубки*  
б) *а – поверхность отверстия шайбы; б – наружная поверхность шайбы*

Разработанный технологический процесс реверсивной вырубки подтвержден патентом [3], в котором приведено описание устройства, обеспечивающего первичную, реверсивную и окончательную вырубку за один ход штампа.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сергиев, А. П. Проведение контрольных экспериментов для оптимизации нового технологического процесса реверсивной вырубки листовых деталей [Текст] / А.П. Сергиев, А.А. Проскурин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 5. – 2012. – С. 99-103.
2. Беккерт М. Способы металлографического травления: справ. изд. [Текст] / М. Беккерт, Х. Клемм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: *Металлургия*, 1988. – 400 с.
3. Патент на полезную модель № 126270 Российская Федерация, МПК B21D. Устройство реверсивной вырубки листовых деталей / А. П. Сергиев, А. А. Проскурин. - №2012125098; заявл. 15.06.2012; опубл. 27.03.2013.

**Сергиев Аркадий Петрович**  
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»  
Профессор кафедры «Технологии и оборудование в металлургии и машиностроении»  
Тел.: +7 (919) 4308250  
E-mail: omd\_sti\_misis@mail.ru

**Проскурин Денис Александрович**  
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»  
Ассистент кафедры «Технологии и оборудование в металлургии и машиностроении»  
Тел.: +7 (960) 6235346  
E-mail: deninio@mail.ru

**Макаров Алексей Владимирович**  
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»  
К.т.н., доцент кафедры «Технологии и оборудование в металлургии и машиностроении»  
Тел.: +7 (952) 4359010  
E-mail: makarov.av@mail.ru

A.P. SERGIEV, A.V. MAKAROV, A.A. PROSKURIN

## **STUDY OF REVERSE INITIAL VERSUS STRAIN ON STRUCTURAL CHANGES IN COLD ZONE SHEAR STAMPING**

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Sergiev AP Conduct control experiments to optimize the new process reversible cutting sheet metal parts [Text] / A.P. Sergiev, A.A. Proskurin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology* – № 5. – 2012. – P. 99-103.
2. Beckert M. Metallographic etching methods: Ref. ed. Russ. with it. [Text] / M. Beckert, K. Klemm. – 2nd ed., Rev. and add. – Moscow: *Metallurgy*, 1988. – 400 p.
3. Patent for useful model № 126270 Russian Federation, MPK B21D. The device reversible cutting of sheet parts / A. P. Sergiev, A. A. Proskurin. no 2012125098; Appl. 15.06.2012; publ. 27.03.2013.

**Sergiev Arkadij Petrovich**  
Stary Oskol University named by Ugarov A.A. (branch) National University of Science and Technology «MISiS»  
The professor of Department "Technology and equipment in metallurgy and machine-building"  
Phone: +7 (919) 4308250  
E-mail: omd\_sti\_misis@mail.ru

**Proskurin Denis Aleksandrovich**  
Stary Oskol University named by Ugarov A.A. (branch) National University of Science and Technology «MISiS»  
Postgraduate, the assistant of Department "Technology and equipment in metallurgy and machine-building"  
Phone: +7 (960) 6235346  
E-mail: deninio@mail.ru

**Makarov Aleksej Vladimirovich**  
Stary Oskol University named by Ugarov A.A. (branch) National University of Science and Technology «MISiS»  
The associate professor of Department "Technology and equipment in metallurgy and machine-building"  
Phone: +7 (952) 4359010  
E-mail: makarov.av@mail.ru

С.В. БАРИНОВ, А.В. ЯШИН

**ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЕФОРМАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*Установлена возможность создания в материале гетерогенной структуры поверхностным пластическим деформированием. Рассмотрены упрочненные области, формирующиеся в поверхностном слое, после накатывания и статико-импульсной обработки. Произведена оценка долговечности упрочненных поверхностей.*

**Ключевые слова:** *поверхностное пластическое деформирование, твердость, долговечность, равномерность упрочнения, гетерогенная структура.*

Обеспечение высокой долговечности деталей машин является актуальной задачей современного машиностроения. Достаточно часто её повышают за счет применения различных упрочняющих обработок, увеличивающих твердость несущего поверхностного слоя. В настоящее время широкое применение находят технологии, обеспечивающие повышение долговечности за счет создания в материале чередующихся твердых и вязко-пластичных областей, образуя, таким образом, гетерогенную структуру.

Такие технологии реализуются с помощью известных методов термической, химико-термической обработки, нанесением покрытий и т.д. [1]. Они в основном формируют неравномерно упрочненный поверхностный слой с характерно выраженными внутренними границами перехода к неупрочненному металлу, что способствует появлению концентраторов напряжений и возникновению усталостных трещин.

Деформационное упрочнение лишено данного недостатка, оно позволяет увеличивать твердость, создавая при этом плавный переход между упрочненной областью и основным материалом. Кроме того, преимуществом использования ППД является низкая энергоемкость и простота применяемой технологической оснастки.

Среди имеющихся способов формирования гетерогенной структуры практически отсутствуют технологии, в основе которых лежит поверхностное пластическое деформирование (ППД). Это связано с технологическими сложностями получения известными методами ППД поверхностного слоя, обладающего одновременно большой глубиной (до 3 мм и более) и требуемой равномерностью упрочнения.

Новый способ – статико-импульсная обработка (СИО) дал возможность использования ППД для получения гетерогенной структуры, за счет воздействия на упрочняемую поверхность управляемых ударных импульсов, которые обеспечивают более широкие возможности по формированию упрочненного поверхностного слоя глубиной до 6...8 мм и повышению твердости до 6500 МПа [2]. При СИО пластическое деформирование упрочняемого материала осуществляется импульсной нагрузкой, которая является следствием возникновения в ударной системе, при ударе, волн деформации и управляется её геометрическими параметрами. Статическая составляющая нагрузки практически не участвует в процессе упруго-пластического деформирования и предназначена для наиболее полного использования импульсной. В результате, упрочненная поверхность состоит из пластических отпечатков, которые перекрываются между собой в заданном порядке. Их перекрытие и будет определять равномерность упрочнения, которая характеризуется коэффициентом перекрытия:

$$K = 1 - \frac{X}{\delta};$$

$$X = \frac{s}{f60},$$

где:  $X$  – расстояние между центрами отпечатков, мм;

$s$  – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин;

$\delta$  – размер отпечатка, измеряемого в направлении смещения очага деформации, мм;

$f$  – частота ударов, Гц.

Таким образом, если  $K = 0$ , т.е.  $x = \delta$  край одного отпечатка граничит с краем другого; если  $0 < K < 1$ , когда  $x < \delta$  – отпечатки перекрываются; при  $K = 1$  происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место. В результате предварительных исследований установлено, что при режимах обработки когда  $0 \leq K \leq 0,5$ , формируется явно выраженная гетерогенная структура упрочненного поверхностного слоя, для которой характерно чередование твердых и мягких областей [2,3].

Для оценки влияния равномерности деформационного упрочнения на долговечность использовались образцы из стали 40X. В одних, статико-импульсной обработкой была создана гетерогенная структура, в других, с помощью статического метода ППД – накатывания роликом, получен равномерно упрочненный поверхностный слой. Для оценки равномерности упрочнения под обработанными поверхностями была измерена микротвердость по глубине и в направлении подачи инструмента. По результатам измерения микротвердости построены эпюры её распределения в поверхностном слое (рисунки 1, 2).

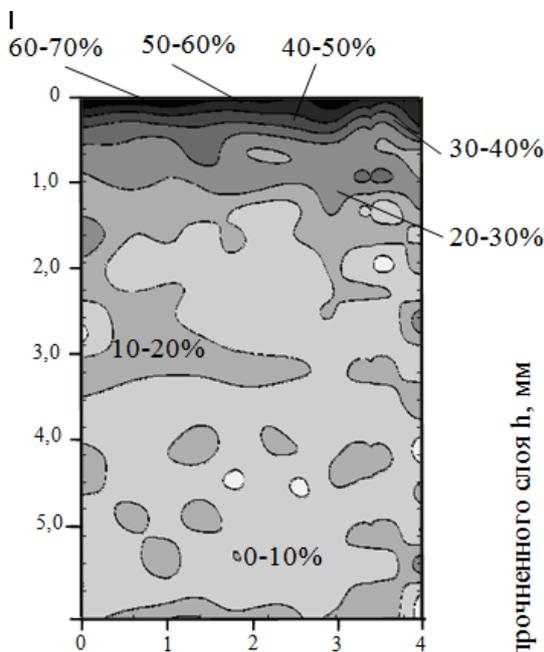


Рисунок 1 – Эпюра распределения степени упрочнения ( $\Delta HV$ ) в поверхностном слое стали 40X, после накатывания стержневым роликом шириной 6 мм, диаметром 10 мм, с силой 23000Н.

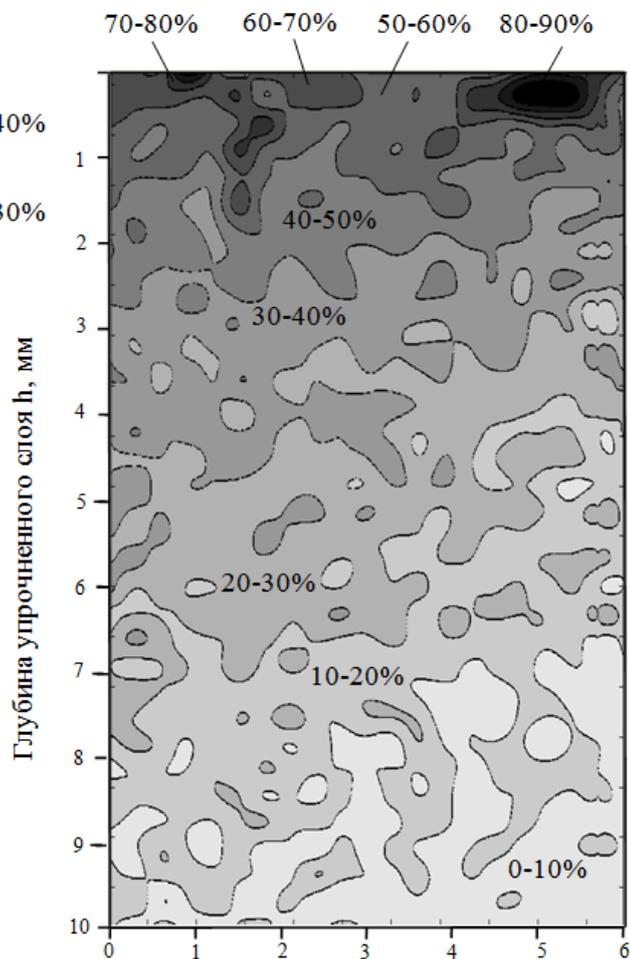


Рисунок 2 – Эпюра распределения степени упрочнения ( $\Delta HV$ ) в поверхностном слое стали 40X с гетерогенными областями, после СИО, с удельной энергией ударов 5 Дж/мм, частотой ударных импульсов  $f=12$  Гц, коэффициентом перекрытия  $K=0,4$ .

После накатывания роликом в материале получен поверхностный слой с максимальной степенью упрочнения ( $\Delta HV$ ) 60–70% и толщиной 2 мм (рисунок 1). Полученная упрочненная область равномерно расположена по поверхности. С увеличением глубины степень упрочнения постепенно уменьшается, плавно переходя к значению основного материала.

В результате статико–импульсной обработки сформированная гетерогенная структура в поверхностном слое представляет собой области с меняющимися участками различной твердости (рис.2). На поверхности, обработанного материала, она состоит из твердых участков со степенью упрочнения 80–90%, которые чередуются с более вязкими и пластичными областями с  $\Delta HV=70-80\%$  и 60–70%. На глубине 0,5 мм возникают участки со степенью упрочнения 40–50%, которые к 1,5 мм плавно переходят в области с  $\Delta HV=30-40\%$ . Они в свою очередь, на уровне 3 мм, постепенно заменяются на подслои с  $\Delta HV=20-30\%$ . На уровне 4 мм начинают располагаться области с  $\Delta HV=10-20\%$ , которые на глубине 7–9 мм постепенно переходят в основной материал.

Оценка долговечности образцов с различной равномерностью деформационного упрочнения была выполнена в результате контактно усталостных испытаний, посредством обкатывания поверхностей шарами, согласно методике [4]. В результате было установлено, что долговечность после накатывания роликом повысилась в 1,5...2 раза, а у созданного СИО гетерогенно упрочненного поверхностного слоя в 5 раз.

Выводы:

- установлена возможность создания в поверхностном слое чередующихся твердых и пластичных участков (гетерогенной структуры) деформационным упрочнением статико–импульсной обработкой;
- в результате эксплуатационных испытаний подтверждена эффективность созданной СИО гетерогенно упрочненной структуры, т.к. ее долговечность, относительно неупрочненной, была повышена в пять раз, а долговечность равномерно упрочненной структуры после накатывания роликом, только в два раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев, Д.Л. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенно наклепанной структуры [Текст] / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, С.В. Баринов // Тяжелое машиностроение, 2010. – № 7. – С. 4–7.
2. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико–импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
3. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико–импульсной обработкой [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. – №7(43). – С. 9–15.
4. Киричек, А.В. Экспериментальный комплекс для исследований контактно–усталостного изнашивания деталей машин [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, Д.Е. Тарасов // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», – 2009. – № 3–2/275 (561). – С. 7–13.

#### **Баринов Сергей Владимирович**

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г Муром

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного проектирования машин

Tel: (49234) 77144;

E-mail: box64@rambler.ru

#### **Яшин Александр Васильевич**

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г Муром

Студент

Tel: (49234) 77144;

E-mail: box64@rambler.ru

S.V. BARINOV, A.V. YASHIN

## FORMATION HETEROGENEOUS STRUCTURE DEFORMATION STATICS HARDENING PULSE PROCESSING

*The possibility of creating a heterogeneous structure of the material surface plastic deformation. Considered hardened region formed in the surface layer after rolling and static pulse processing. An assessment of the durability of hardened surfaces.*

**Keywords:** *surface plastic deformation, hardness, durability, uniformity of hardening, the heterogeneous structure.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Solov'yev, D.L. Povysheniye dolgovechnosti detaley mashin sozdaniyem geterogenno naklepannoy struktury [Text] / D.L. Solov'yev, A.V. Kirichek, S.V. Barinov // Tyazheloye mashinostroyeniye, 2010. – № 7. – p.p. 4–7.
2. Kirichek, A.V. Tekhnologiya i oborudovaniye statiko–impul'snoy obrabotki poverkhnostnym plasti-cheskim deformirovaniyem [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yev, A.G. Lazutkin. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 288 p.
3. Kirichek, A.V. Povysheniye kontaktnoy vynoslivosti detaley mashin geterogennym deformatsionnym uprochneniyem statiko–impul'snoy obrabotkoy [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yev, S.V. Barinov, S.A. Silant'yev // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya, 2008. – №7(43). – p.p. 9–15.
4. Kirichek, A.V. Eksperimental'nyy kompleks dlya issledovaniy kontaktno–ustalostnogo iznashiva-niya detaley mashin [Text] / A.V. Kirichek, D.L. Solov'yev, S.V. Barinov, D.Ye. Tarasov // Izvestiya OrelGTU, seriya «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii», – 2009. – № 3–2/275 (561). – p.p. 7–13.

#### **Barinov Sergey Vladimirovich**

Murom Institute of Vladimir State University, Murom  
Ph.D., head of cathedra "Automated design of machines"  
Tel: (49234) 77144; E-mail: box64@rambler.ru

#### **Yashin Alexander Vasilevich**

Murom Institute of Vladimir State University, Murom  
student  
Tel: (49234) 77144; E-mail: box64@rambler.ru

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Статья посвящена обработке изделий на станках с числовым программным управлением. Предложен метод параметрического программирования станков с числовым программным управлением и рассмотрены примеры его применения при обработке изделий. Рассмотрен способ повышения качества обрабатываемой поверхности на станках с числовым программным управлением, с помощью возможностей параметрического программирования.*

**Ключевые слова:** система числового программного управления, параметрическое программирование, автоколебания, электропривод.

Для создания конкурентоспособной продукции необходимо располагать современной технологией её изготовления с применением высокопроизводительного быстроперенастраиваемого оборудования. В металлообрабатывающем производстве таким требованиям отвечают современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ). При использовании таких станков качество обработки зависит напрямую от качества управляющих программ. В связи с этим формируются требования к квалификации оператора станка с ЧПУ, сокращается время обработки детали и увеличивается срок службы инструмента за счет оптимизации режимов резания. Поэтому для эффективного использования станков с ЧПУ предъявляются высокие требования к процессу подготовки управляющих программ.

В условиях современного производства подготовка управляющих программ осуществляется разными методами с помощью различных технических и программных средств. Эти методы ориентированы либо на автоматическое (САМ– системы), либо на ручное программирование. Для выбора того или иного метода программирования важно учитывать основные требования и критерии оценки управляющей программы, такие как:

- *точность* – управляющая программа должна обеспечивать максимально точную обработку и содержать минимальное количество ошибок;
- *экономичность* – удельная стоимость разработки управляющей программы, определяется такими показателями как время разработки и отладки программы, стоимость инструментария и сложность программ;
- *практичность* – показатель простоты, удобства и скорости выполнения тестирования и отладки управляющей программы, а также обработки детали;
- *эффективность* – набор атрибутов, относящихся к соотношению между уровнем качества функционирования управляющей программы и временем затрачиваемых на обработку;
- *краткость* – характеризует отсутствие лишней дублирующейся информации;
- *гибкость* – характеризует способность настраивать программу на аналогичные циклы обработки.

Естественно, что автоматизированная разработка программ для станков с ЧПУ характеризуется меньшими затратами времени, однако в ряде случаев отладка этих программ весьма более сложна, чем при ручном программировании. Поэтому выбор используемого метода создания управляющих программ определяется конкретными условиями производства, такими как: номенклатура деталей, парк станков, возможности систем ЧПУ, финансовые возможности предприятия, уровень квалификации специалистов.

Одним из способов создания управляющих программ, полностью удовлетворяющих вышеизложенным критериям и требованиям, является метод параметрического программирования. Производители систем управления используют параметрическое программирование в качестве расширения G–кода. Его можно сравнить с компьютерными языками программи-

рования, такими как Basic, но он может быть доступен на уровне G-функций (кодов). В отличие от ЧПУ программирования, в параметрическом программировании расширяются возможности, сравнимые с объектно-ориентированными. Используя его в системах управления ЧПУ становится возможной вариантность вычисления, применение логических операторов, работа с проходами инструмента, движениями манипуляторов. Добавляются элементы, осуществляющие полный контроль над ЧПУ – доступ к системным переменным и ячейкам программы электроавтоматики, возможность создавать свои собственные G-коды и функции, которые наиболее полно реализуют управление всех компонентов станка. Возможен доступ к параметрам ЧПУ, хранящим информацию об инструменте, положении рабочих органов, манипуляторов, системы координат, значений G-кода управляющей программы и ошибок.

Подобно компьютерным языкам программирования, в параметрическом программировании существует несколько версий языков: Custom Macro, Macro B, User Task (Okuma), Q Routine (Sodick), Advanced Programming Language (APL G&L). Например, в СЧПУ Fanuc этот язык называется Macro B, из подмножества языка Basic. С помощью параметрического программирования возможно разрабатывать диалоговые управляющие программы, организовать дополнительные информационные окна и работать с подпрограммами (макропрограммами). Макропрограммой называется программа, которая находится в памяти СЧПУ и содержит различные макрокоманды. Макропрограмму можно вызывать из обычной программы обработки с помощью G кода, аналогично постоянным циклам. Такие программы могут выполняться в активном режиме, в ходе выполнения основной управляющей программы или в фоновом режиме, в свободное от всех других задач время.

Как правило, макропрограмма представляет собой отдельную программу, содержащую код для выполнения однотипных задач, таких как обработка повторяющихся контуров детали при многопроходной обработке (например, при фрезеровании и растачивании); расчёт координат сетки отверстий, в которых необходимо выполнить несколько операций (сверление многоуровневых отверстий, фрезерование фасок, нарезание резьбы). Примером такой задачи может служить обработка типовой детали, эскиз которой представлен на рисунке 1.

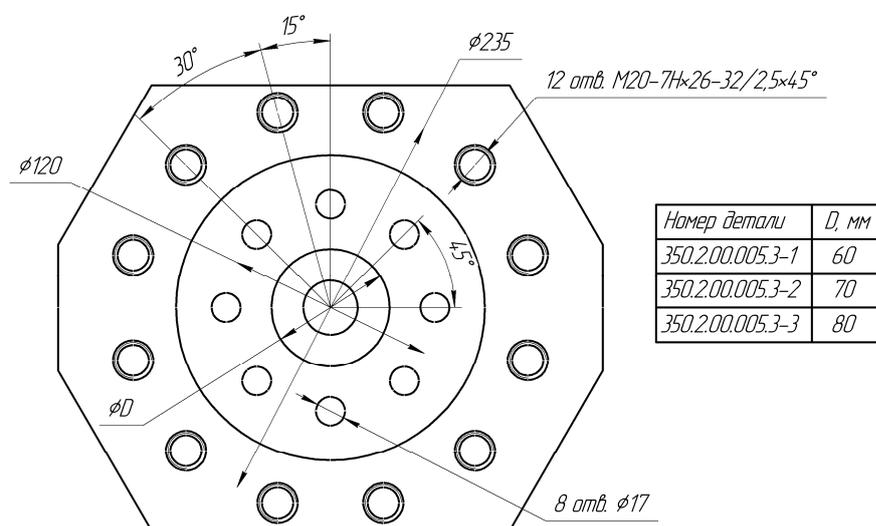


Рисунок 1 – Эскиз типовой детали для макропрограммирования

В стандартном программировании, с помощью G-кода, должны быть рассчитаны координаты центров для каждого отверстия, и ввод координат повторяется для каждого инструмента, используя соответствующий цикл обработки. В подпрограмме может быть рассчитано положение отверстий один раз, затем значения координат сохраняются в переменных и могут многократно использоваться для различных операций с использованием различных циклов обработки.

При обработке данной детали необходимо выполнить операции зенкования фасок и нарезания резьбы в двенадцати отверстиях. При создании управляющей программы, например, используя САМ–системы, координаты для выполнения круговой и винтовой интерполяции будут прописаны для каждого отверстия, что значительно увеличит код управляющей программы и усложнит её дальнейшую отладку на станке. Используя метод параметрического программирования и относительную систему координат, становится возможным вызывать макропрограммы зенковки и резьбофрезы для каждого отверстия, тем самым сократив объем кода программы в двенадцать раз.

Если размер файла управляющей программы не имеет значения, необходимо стремиться сократить количество повторяющихся данных в коде программы. Основной причиной этого является снижение вероятности возникновения ошибки при редактировании программы и в процессе её отладки. Например, при изменении чертежа, инженеру–программисту не нужно строить новую модель детали и генерировать код управляющей программы, достаточно лишь внести изменения в соответствующую макропрограмму. Такое редактирование возможно произвести непосредственно на пульте системы ЧПУ, что значительно сократит время редактирования управляющей программы и повысит её эффективность.

Благодаря параметрическому программированию, возможность редактирования управляющих программ появляется у оператора станка с ЧПУ. Например, у рассматриваемой типовой детали существует несколько модификаций в зависимости от диаметра обניжения D. При создании управляющих программ с помощью САМ–систем в этом случае необходимо иметь три программы, что не рационально по отношению к дисковому пространству системы ЧПУ. Используя макропрограммы становится возможным вести обработку лишь по одной управляющей программе для всех модификаций детали. Оператор станка в диалоговом режиме выбирает номер модификации детали перед началом выполнения управляющей программы. Такой метод позволяет не только сэкономить дисковое пространство системы ЧПУ, но и значительно сократить время работы инженера–программиста по созданию управляющих программ, так как модификаций детали может быть не только три, как в приведённом примере, но и значительно больше.

Метод параметрического программирования может быть использован не только для повышения эффективности процесса разработки и отладки управляющих программ, но и для повышения качества обрабатываемых деталей. На основе параметрического программирования был реализован способ повышения виброустойчивости процесса резания непосредственно в процессе обработки. Способ основан на постоянном периодическом изменении скорости резания, которое способствует гашению автоколебаний за счет гашения автоколебаний и исключения резонансных явлений [1]. Такие незначительные изменения частоты вращения получили название «девиация скорости резания» [1].

Однако при этом возникает проблема управления электроприводом таким образом, чтобы обеспечивалась подобная девиация за счет периодического изменения частоты вращения шпинделя. Это относительно просто обеспечивается при использовании комплектных электроприводов с аналоговым управлением путем периодического изменения уровня управляющего напряжения за счет наложения на него дополнительного сигнала. Однако в настоящее время на современных станках с ЧПУ используется цифровой способ управления частотой вращения шпинделя [2], что не позволяет использовать подобные способы управления. Решение этой задачи еще более осложняется, если регулирование частоты вращения осуществляется посредством сервоусилителя, связанного с системой ЧПУ по оптическому каналу [3], что исключает возможность подключения дополнительных блоков коррекции (рисунок 2). Поэтому техническая реализация этого способа на станках с ЧПУ может быть основана только на использовании специальных макропрограмм, изменяющих частоту вращения привода главного движения в функции выбранного параметра обработки, например, одной из координат. Для этого используются возможности параметрического программирования.

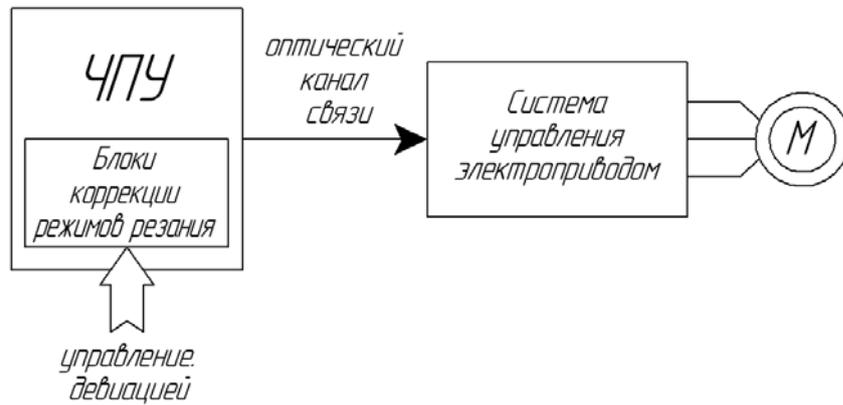


Рисунок 2 – Цифровое управление электроприводом

На рисунке 3 представлен фрагмент управляющей программы для выполнения операции растачивания и макропрограмма, реализующая метод девиации.

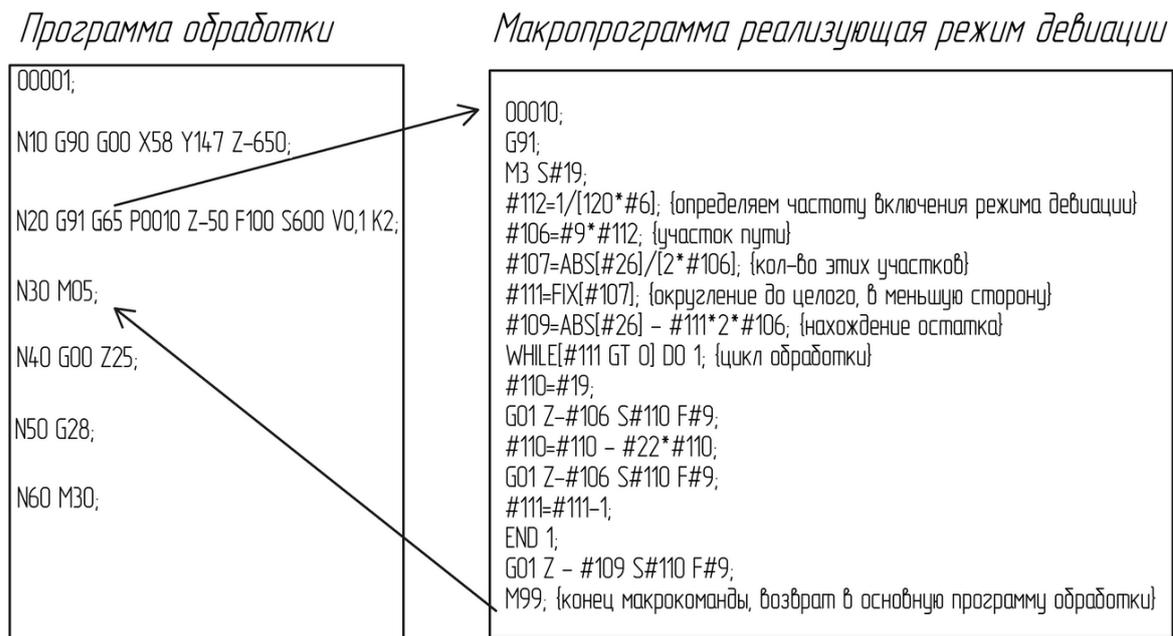


Рисунок 3 – Вызов макропрограммы для реализации метода управляемой девиации скорости резания

Процесс растачивания отверстия был выбран для проведения экспериментов на станке, с целью дальнейшей отладки макропрограммы. Использование метода девиации и управление частотой вращения привода главного движения также возможно и при других технологических операциях. Эксперименты по реализации режимов девиации скорости резания проводились на вертикальном обрабатывающем центре фирмы Tongtai модели TMV-720AD с системой ЧПУ Fanuc FS 0i-MC [3], который предназначен для обработки с использованием различного режущего инструмента. На станке возможна обработка наружных и внутренних, плоских и фасонных поверхностей, пазов, уступов, зубьев зубчатых колёс и т.п. При этом можно выполнять несколько операций механической обработки за счет автоматической замены режущего инструмента из магазина.

Параметры вращения шпинделя задавались в основной программе на основании планируемых экспериментов с поочередным варьированием каждого параметра на двух уровнях, план проводимого эксперимента приведён в таблице 1. Для большей достоверности и определения эффективности работы макропрограммы эксперименты проводились сериями, при этом использовались возможности ручного и автоматического управления работой станка.

Таблица 1 – План проведения экспериментов

№ эксперимента	Номинальная частота вращения, S (об/мин)	Изменение частоты вращения, $\Delta S$ (%)	Частота включения режима девиации, $\Delta t$ (Гц)
1	600	5	0,5
2	600	5	1
3	600	5	2
4	1500	5	0,5
5	1500	5	1
6	1500	5	2

Результаты эксперимента фиксировались на дисплее системы ЧПУ, а также для дальнейшего изучения и проверки достоверности показаний сохранялись в виде видео файлов. Для наглядности фиксируемых данных на шпиндель станка была нанесена метка, позволяющая при покадровом воспроизведении видео материалов рассчитать частоту вращения шпинделя, что позволило построить переходные процессы для различных частот вращения и параметров девиации.

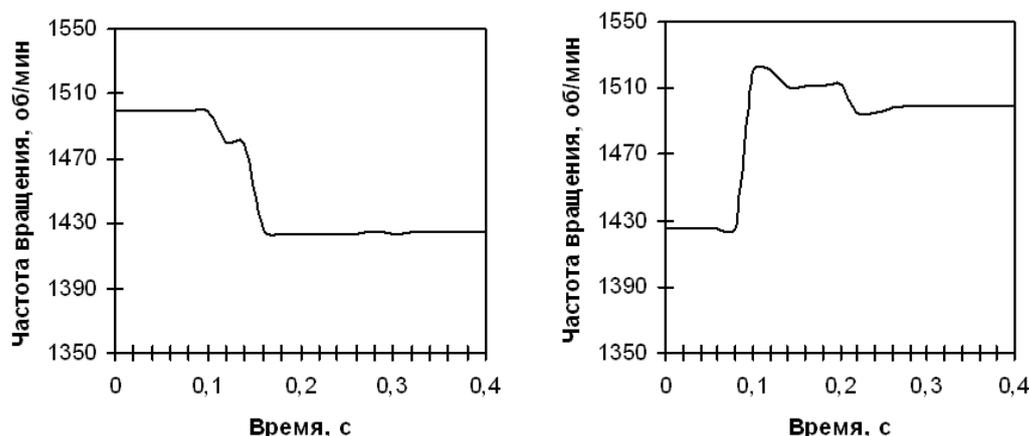


Рисунок 4 – Изменение частоты вращения при торможении и разгоне в режиме девиации максимальная частота вращения – 1500 об/мин, частота девиации – 2 Гц, амплитуда девиации – 5%

Анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что продолжительность переходного процесса разгона превышает продолжительность переходного процесса торможения, и является, таким образом, лимитирующим процессом, определяющим предельно возможную частоту девиации. Эта частота в пределе может быть увеличена до 4 герц. Дальнейшее повышение частоты может привести к нежелательным перегрузкам привода. Однако достигнутые параметры девиации вполне достаточны для устранения автоколебаний в процессе обработки и улучшения качества обработанной поверхности.

Проведённые исследования показали возможность реализации метода программного управления девиацией привода главного движения на станке с ЧПУ по заданной макропрограмме. Разработанная макропрограмма является достаточно универсальной и может встраиваться в любые программы для обработки изделий на станках с ЧПУ. Полученные результаты подтверждают эффективность использования метода параметрического программирования.

Таким образом, использование параметрического программирования и макропрограммирования при разработке программ для станков с ЧПУ расширяет функциональные возможности таких станков и в ряде случаев использование таких программ эффективнее, чем программ, разработанных на основе автоматизированного программирования с использованием САМ-систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин, А.А. Использование систем ЧПУ на основе персональных компьютеров (PCNC) для управления девиацией параметров режима резания [Текст] / А.А. Афонин, Н.А. Афонина, А.Б. Орлов // Известия ТулГУ. Серия Технологическая системотехника, 2003. – С. 50–56.
2. Иванов, В.М. Электроприводы с системами числового программного управления [Текст] / В.М. Иванов. – Ульяновск: УлТГУ, 2006. – 152 с.
3. Руководство по эксплуатации FANUC серия 0i Mate – TC.

### **Трунов Сергей Николаевич**

Тульский государственный университет, г. Тула  
Аспирант кафедры «Автоматизированные станочные системы»  
E-mail: tsn.88@mail.ru

S.N. TRUNOV

## **AUTOMATE THE PROCESSING OF ARTICLES ON MACHINE TOOLS NUMERICALLY CONTROLLED BASED ON PARAMETRIC PROGRAMMING**

*Article is devoted to the processing of articles on machine tools with numerical control. Proposed a method of parametric programming machines with numerical control and the examples of its use in the treatment of products. The way of improving the quality of the treated surface with CNC controlled by parametric programming opportunities.*

**Keywords:** numerical control system, parametric programming, self-oscillation, the electric drive.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Afonin, A.A. Ispol'zovaniye sistem CHPU na osnove personal'nykh komp'yutеров (PCNC) dlya upravleniya devyatsiyey parametrov rezhima rezaniya [Text] / A.A. Afonin, N.A. Afonina, A.B. Orlov // Izvestiya TulGU. Seriya Tekhnologicheskaya sistemotekhnika, 2003. – p.p. 50–56.
2. Ivanov, V.M. Elektroprivody s sistemami chislovogo programmного upravleniya [Text] / V.M. Ivanov. – Ul'yanovsk: UITGU, 2006. – 152 p.
3. Rukovodstvo po ekspluatatsii FANUC seriya 0i Mate – TC.

### **Trunov Sergey Nikolaevich**

Tula State University, Tula  
Graduate student "Automated Machine Tools"  
E-mail: tsn.88@mail.ru

М.А. АФАНАСЕНКОВ

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Рассмотрен алгоритм системного подхода к процессу разработки условий и методов формирования на поверхности режущего инструмента функциональных слоев, с учетом всех особенностей его дальнейшего применения для обработки конкретного типа заготовок.*

**Ключевые слова:** системный подход, функциональный слой, режущий инструмент, износостойкие покрытия, эксплуатационные свойства, увеличение стойкости.

Одной из основных тенденций современного машиностроения является повышение производительности механообработки при сохранении требуемых качества и точности деталей машин. Эффективность лезвийной обработки на современном этапе развития машиностроения в немалой степени зависит от работоспособности режущего инструмента, которая, в первую очередь, определяется сочетанием физико–механических свойств инструментального материала – твердостью, прочностью, износостойкостью и т.п. Однако, получение оптимального сочетания таких свойств в объеме материала режущего инструмента представляет значительные трудности.

Поскольку создание нового материала является чрезвычайно длительным и дорогостоящим процессом, то наиболее эффективной является разработка технологий нанесения защитных износостойких покрытий на рабочие поверхности режущего инструмента [1].

Улучшение эксплуатационных характеристик инструментов является одним из основных направлений повышения ресурса и надежности их работы. Основные и наиболее важные эксплуатационные показатели работоспособности инструментов в значительной степени определяются качеством поверхностных слоев, потому формирование высококачественных поверхностных слоев – одно из наиболее эффективных средств повышения работоспособности инструментов.

Наряду с традиционными способами повышения эксплуатационных свойств режущего инструмента в настоящее время применяются новые перспективные, так называемые, физико–технические, или электрофизические методы обработки. Эти методы, как правило, связаны с использованием различных источников энергии и способны гораздо сильнее влиять на свойства поверхностных слоев инструмента, чем традиционно применяемая поверхностная обработка упрочнения. К таким способам относится обработка изделий в вакууме с использованием энергии пучков ускоренных ионов и атомов [2, 3].

В современном автоматизированном машиностроительном производстве важную роль играет внедрение инновационных технологий, позволяющих в значительной мере увеличивать производительность обработки резанием, обеспечивать высокую гибкость производственных процессов. Так же, тенденция увеличения объема механической обработки резанием и рост расходов на её осуществление предъявляют высокие требования к экономическим показателям эффективности машиностроительных производств и, как следствие, возникает необходимость узкого специализированного использования различного режущего инструмента и режимов резания для обработки различных материалов с определенным химическим составом и свойствами.

Режущий инструмент является наиболее уязвимым звеном в технологических системах автоматизированного производства, поэтому использование современного высокопроизводительного и качественного режущего инструмента повышенной надежности, позволяет заметно увеличить эффективность автоматизированного производства и надежность его функционирования. Важной особенностью режущего инструмента является возможность его использования с применением различных смазочно–охлаждающих технологических сред

(СОТС), позволяющих так же повысить износостойкость. При подборе предпочтение отдается режущему инструменту физико–механические, теплофизические и кристаллофизические свойства, которого наиболее полно отвечают условиям резания. Следует отметить, что как нет идеального, или универсального инструментального материала, также нет и какого–то универсального покрытия или метода упрочнения режущего инструмента. Чтобы достичь максимальной эффективности обработки для каждой конкретной технологической операции механической обработки и для каждого конкретного материала обрабатываемой заготовки целесообразно выбирать наиболее рациональный инструментальный материал и метод его упрочнения или покрытия.

В настоящее время различают методы электронно–лучевой (ЭЛО), светолучевой (СЛО), ионно–вакуумной (ИВО) и плазменной обработки (ПО) поверхностей заготовок. Все перечисленные методы отличаются хорошей управляемостью, являются универсальными, с точки зрения возможности обработки почти любых материалов, возможностью автоматизации процесса и др. Но и обладают рядом схожих недостатков, таких как высокая стоимость оборудования, высокие требования к технике безопасности при эксплуатации оборудования и высокая квалификация обслуживающего персонала.

Однако из вышеперечисленных методов стоит выделить метод ионно–вакуумной обработки, т.к. помимо прочих положительных характеристик, он, так же, создает возможность образования в поверхностных слоях режущего инструмента сплавов с любым соотношением концентраций их составляющих, которые не лимитируются принципами термодинамики, что позволяет в поверхностных слоях получать практически любые наперед заданные физико–химические, химические и, вследствие этого, эксплуатационные свойства. Так же в результате ИВО практически не изменяются размеры и форма изделий, что позволяет применять способ как окончательную финишную обработку. Такие положительные характеристики метода ИВО делают его наиболее эффективным при обработке сменных твердосплавных пластин для режущего инструмента из–за их малого размера, что является ограничивающим фактором метода, т.к. экономическая эффективность снижается по мере увеличения размеров установки.

Так же стоит отметить широкий диапазон возможностей ИВО в области подготовки поверхностей заготовок к последующему нанесению рабочего слоя. Способы ионно–вакуумного расщепления вещества позволяют: очистить поверхность изделия для последующего нанесения вакуумного покрытия, распылить дефектные поверхностные слои, уменьшить шероховатость поверхностей изделий (планаризация) и др. Способы поверхностного ионно–вакуумного легирования, в свою очередь, позволяют упрочнять поверхности изделий (особенно рабочие поверхности режущих и прессово–штамповых инструментов), подвергнуть их модификации, с целью улучшения эксплуатационных свойств (износо–, коррозионно–, теплостойкость и пр.), а также легировать, для получения композитных материалов с особыми свойствами (диэлектрическими, электропроводными или полупроводниковыми поверхностными слоями, теплоизоляционными слоями и др.).

Как было сказано выше, в результате ионно–вакуумного расщепления можно добиться частичного удаления дефектного поверхностного слоя. Ионно–вакуумная имплантация позволяет внедрить в поверхностный слой специальным образом выбранные химические элементы, которые могут образовывать как в процессе имплантации, так и во время эксплуатации инструментов заранее прогнозируемые химические соединения. Последние, в свою очередь, должны блокировать диффузию «вредных» элементов и улучшить некоторые эксплуатационные свойства рабочих поверхностей инструмента, что напрямую способствует повышению работоспособности инструментов.

Однако до настоящего времени отсутствует общепризнанный комплексный подход к исследованию закономерностей построения технологических процессов ИВМ инструментов. Без учета данных, в полной мере объясняющих механизмы явлений, возникающих как при эксплуатации режущих инструментов, так и при реализации способов ИВО невозможно научно обоснованно спроектировать технологические процессы ИВМ, в том числе и нанесения покрытий.

За последние годы накоплено большое число экспериментальных работ, свидетельствующих о значительном интересе к обработке, использующей потоки высокоэнергетических частиц [4,5]. На данный момент возникла необходимость в разработке системного подхода к подбору имплантируемых элементов и элементов покрытия, обеспечивающих физико-химические свойства наносимых слоев. Так же необходимы методические указания и алгоритмы действий для подбора методов нанесения покрытий, разработке поэтапного технологического процесса и выбора установки, для реализации метода, с учетом особенностей и требований производств.

Предложенный ниже алгоритм поэтапной разработки условий и методов формирования на поверхности инструмента функциональных слоев позволит систематизировать подход к разработке типового технологического процесса для проектирования узкоспециализированного режущего инструмента. В данном алгоритме охвачена целиком область очередности действий, включающая в себя оценку всех параметров обрабатываемого изделия, разработку технологического процесса нанесения рабочего слоя, выбор химических элементов для модификации, материала основы инструмента и заканчивая выбором установки и метода нанесения износостойкого покрытий.

Одним из первых этапов, необходимых для формирования на поверхности режущего инструмента правильного функционального слоя, является анализ условий эксплуатации изделия, изучение закономерности процессов, происходящих на контактных поверхностях и технических требований, предъявляемых к изделию. При оценке технических требований к изделию необходимо учитывать его назначение, особенности геометрической формы, физико-механические свойства материала, требуемые параметры качества поверхности и пр.

Тщательное изучение технических требований к изделию позволяет сформировать технологический процесс для его обработки и произвести анализ режимов резания, необходимых для изготовления будущего изделия. Данные по типу и числу технологических переходов, полученные в результате анализа режимов обработки, позволяют определить режимы резания, которые будут использоваться для обработки изделия.

Полученные расчетные данные о режимах резания позволяют определить действительные условия эксплуатации инструмента с нанесенным функциональным покрытием, а значит учесть температурные режимы обработки, нагрузку в зоне резания и пр.

Однако не менее важной для выбора наносимого покрытия на режущий инструмент является и оценка химического состава обрабатываемого изделия. Взаимная химическая инертность элементов, входящих в состав обрабатываемой заготовки и покрытия режущего инструмента позволяет дополнительно снизить износ инструмента и повысить качество обрабатываемой поверхности.

Имея резюмированные данные о химическом составе материала заготовки и условиях работы будущего инструмента с функциональным покрытием, возможно формирование технологического процесса нанесения покрытия на режущий инструмент. Типовой технологический процесс модификации поверхностного слоя режущего инструмента состоит из нескольких технологических переходов:

- 1) Распыление дефектного поверхностного слоя.

Данный переход позволяет получить на поверхности материала основы стехиометрии, определяемой химической формулой сплава основы, провести активизацию поверхностных атомов в кристаллической решетке основы и обеспечивает удаление поверхностного слоя, содержащего дефекты, трещины, поры, примесные адсорбированные атомы.

- 2) Создание переходного модифицированного слоя между основой и последующими подслоями покрытия.

Назначение переходного слоя – плавное изменение физико-механико-химических свойств от основы к покрытию. В некоторых случаях созданный на данном переходе модифицированный слой может быть внешним рабочим слоем инструмента, непосредственно контактирующим с поверхностью заготовки при ее обработке.

- 3) Формирование композитного покрытия.

Состоит из функциональных подслоев, обеспечивающих требуемые физико–химико–механические и эксплуатационные свойства изделия. Перечень требуемых свойств определяется в каждом конкретном случае, исходя из условий работы инструмента, материала и свойств заготовки.

Исходя из имеющихся данных по условиям работы режущего инструмента и разработанный технологический процесс нанесения функционального покрытия на его поверхность, а так же принимая во внимание химический состав материала обрабатываемой заготовки, возможен выбор соответствующих материалов из базы данных для нанесения покрытия на рабочую часть режущего инструмента.

С учетом химического состава наносимого на поверхность режущего инструмента материала объективен выбор наиболее оптимального материала основы инструмента, который в процессе обработки будет обеспечивать наиболее эффективную адгезию наносимого рабочего слоя, тем самым обеспечивая максимально возможный уровень повышения всех эксплуатационных характеристик инструмента.

На заключительном этапе разработки метода формирования на поверхности режущего инструмента износостойкого функционального слоя, целесообразен выбор наиболее эффективного способа его нанесения, а так же, соответственно, установки и условий обработки. Необходимо принимать во внимание особенности технологического процесса, размеры заготовки, объемы партии обрабатываемых инструментов и пр.

Предлагаемый алгоритм, по нашему мнению, обеспечит более структурированный подход к разработке режущего инструмента, позволяя делать наиболее целесообразный выбор всех необходимых частей составляющих процесс его разработки. То есть алгоритм позволит систематизировать и наиболее эффективно применять накопленные знания в области модификации поверхностного слоя режущего инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубарев, Ю.М. Современные инструментальные материалы / Ю.М. Зубарев. – СПб.: Изд-во Лань, 2008. – 224 с.
2. Зубарев, Ю.М. Повышение работоспособности деталей машин и инструментов / Ю.М. Зубарев, Н.Н. Ревин. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. – 125 с.
3. Сенчило, И.А. Технология обработки с использованием потоков высокоэнергетических частиц / И.А. Сенчило, Ю.М.Зубарев, А.Ф. Бабошкин и др. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2004. – 116 с.
4. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С.Н. Григорьев. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2011. – 368 с.
5. Зубарев, Ю.М. Системный подход к подбору имплантирующих элементов при ИВМ путем создания алгоритма / Ю.М. Зубарев, А.И. Круглов, Д.В. Семейкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении», 2013. – № 7 (110). – С. 22–25.

**Афанасенков Михаил Алексеевич**

Санкт–Петербургский государственный Политехнический университет  
Институт машиностроения, г. Санкт–Петербург.  
Аспирант, инженер МОП, ЗАО «АКВАМАРИН».  
E–mail: hoggeridze@yandex.ru

M.A. AFANASENKOV

## COMPLEX TECHNIQUES ALGORITHMIZATION FORMATION FUNCTIONAL LAYERS ON THE SURFACE OF CUTTING TOOL

*The algorithm of the system approach to the development process conditions and methods of forming on the surface of the cutting tool functional layers, taking into account all the peculiarities of its further use to handle specific types of blanks.*

**Keywords:** *system approach, the functional layer, cutting tools, wear–resistant coatings, operational properties, increase resistance.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Zubarev, Yu.M. Sovremennyye instrumental'nyye materialy / Yu.M. Zubarev. – SPb.: Izd-vo Lan', 2008. – 224 s.
2. Zubarev, Yu.M. Povysheniye rabotosposobnosti detaley mashin i instrumentov / Yu.M. Zubarev, N.N. Revin. – S-Pb.: Izd-vo S-Pb GPU, 2013. – 125s.
3. Senchilo, I.A. Tekhnologiya obrabotki s ispol'zovaniyem potokov vysokoenergeticheskikh chastits / I.A. Senchilo, Yu.M.Zubarev, A.F. Baboshkin i dr. – SPb., Izd-vo PIMash, 2004. – 116 s.
4. Grigor'yev, S.N. Metody povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta / S.N. Grigor'yev. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye», 2011. – 368 s.
5. Zubarev, Yu.M. Sistemnyy podkhod k podboru implantiruyushchikh elementov pri IVM putem sozdaniya algoritma / Yu.M. Zubarev, A.I. Kruglov, D.V. Semeykin // «Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta» Seriya «Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii», 2013. – №7 (110). – S. 22–25.

**Afanasenkov Mikhail Alekseevich**

Saint-Petersburg State Polytechnic University.  
Institute of Mechanical Engineering, St. Petersburg.  
Graduate student, engineer MOS JSC "Aquamarine."  
E-mail: hoggeridze@yandex.ru

## МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 664.661.016:633.88–021.632]:613.2

В.П. КОРЯЧКИН, Д.Н. АЛЕКСЕНКО, Д.А. ГОНЧАРОВСКИЙ, Р.Е. КЛЕПОВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ФРУКТОВО–ЯГОДНОЙ НАЧИНКИ ДЛЯ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

*В настоящей статье проведено исследование изменения осевого и бокового давления яблочной начинки с виноградным порошком для кондитерских изделий; установлена продолжительность выравнивания осевого и бокового давления начинки от величины начального давления сжатия; выявлена зависимость коэффициента бокового давления от начального давления сжатия и содержания виноградного порошка в яблочной начинке.*

**Ключевые слова:** фруктово-ягодная начинка, виноградный порошок, кондитерские изделия, осевое и боковое давление, коэффициент бокового давления.

Начинки для кондитерских изделий обладают сложным составом и являются неньютоновскими сплошными средами [1]. Поэтому изучение их деформационного поведения в сквозных каналах формующего и транспортирующего оборудования кондитерского производства является важной прикладной задачей.

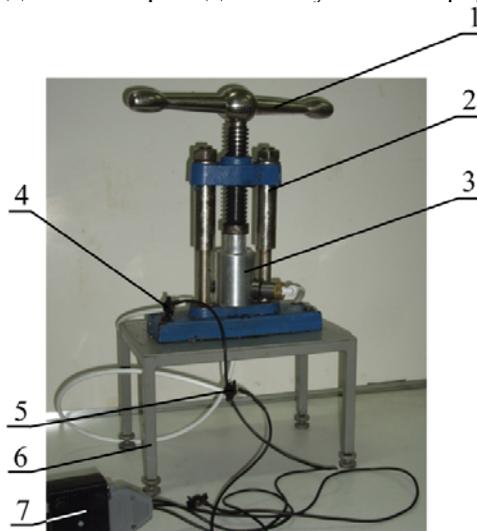
В процессах нагнетания начинок на технологическом оборудовании они проявляют неньютоновское поведение, например давление в объеме начинки, в отличие от закона Паскаля, неравномерно передается по осевому и боковому направлениям. В этой связи исследование коэффициента бокового давления кондитерских начинок, содержащих, в том числе и крупно – дисперсные компоненты, имеет важное практическое значение.

Коэффициент бокового давления является одним из важных реологических параметров кондитерских начинок, который необходимо учитывать в технологических процессах их переработки под давлением, например при транспортировании начинки в сквозных каналах материалопровода, где они подвергаются всестороннему сжатию.

Коэффициент бокового давления  $k_{\text{бд}}$  определяют отношением к осевому давлению  $p_1$  бокового давления  $p_2$ :

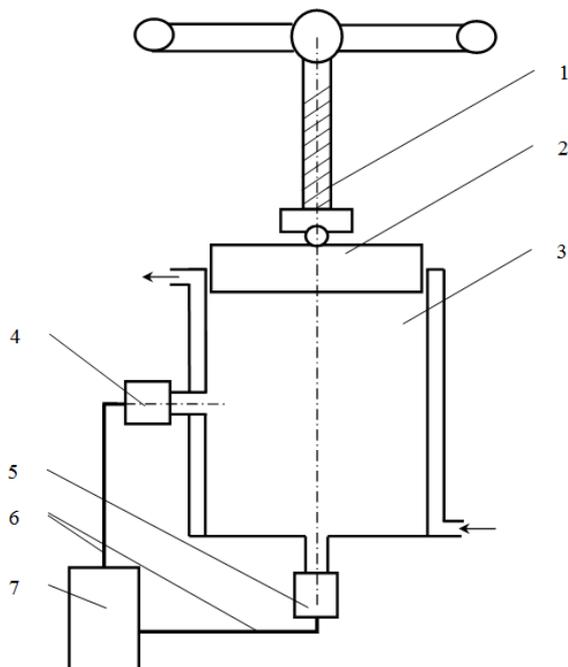
$$k_{\text{бд}} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

Исследование бокового давления проводили на установке [2], представленной на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Установка для исследования коэффициента бокового давления пищевых масс**  
1 – винтовая пара со штурвалом, 2 – стойки, 3 – цилиндр с поршнем и образцом объекта исследования,  
4 – датчик измерения бокового давления, 5 – датчик измерения осевого давления,  
6 – рама с регуляторами уровня, 7 – шина блока АЦП

Установка измерения бокового давления содержит винтовую пару 1 со штурвалом, стойки 2, термостатируемый цилиндр 3 с поршнем для образцов объекта исследования, датчики измерения бокового 4 и осевого 5 давлений, основание 6, раму с регуляторами уровня 7 и шину подключения датчиков давления к компьютеру 9.

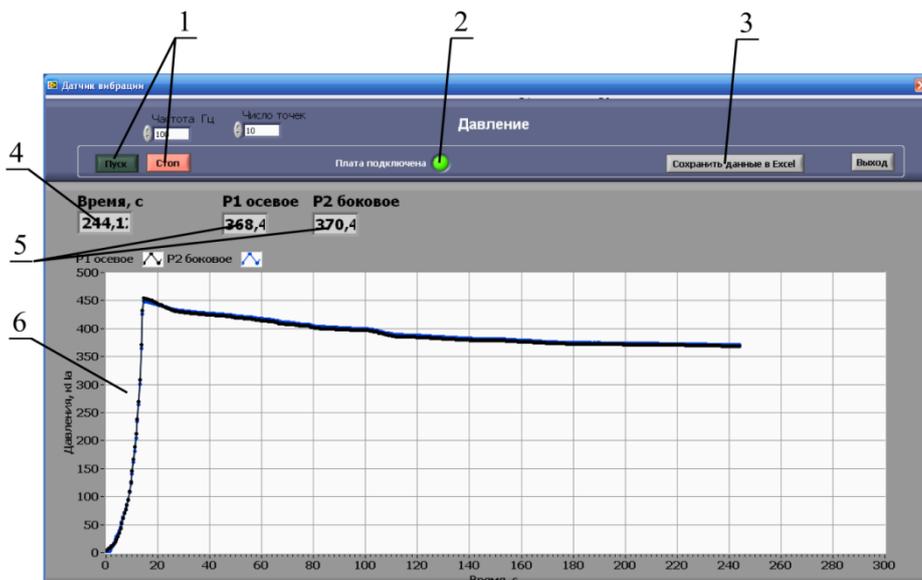


**Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для измерения бокового давления:**

1 – винтовая пара со штурвалом, 2 – поршень, 3 – цилиндр для образцов, 4 – датчик бокового давления, 5 – датчик осевого давления, 6 – кабели от датчиков к АЦП, 7 – блок АЦП

Сигналы измерения осевого  $p_1$  и бокового  $p_2$  давлений регистрировали с использованием виртуального прибора экспериментальной установки при помощи среды графического программирования системы LabVIEW.

На рисунке 3 представлен внешний вид лицевой панели виртуального прибора экспериментальной установки.



**Рисунок 3 – Лицевая панель виртуального прибора компьютерной системы LabVIEW:**

1 – кнопки запуска и остановки измерений, 2 – индикатор «Плата подключена», 3 – кнопка сохранения данных в таблицу, 4 – индикатор регистрации продолжительности опыта, 5 – индикаторы значений осевого и бокового давлений, 6 – поле графиков осевого и бокового давлений

Графическая система LabVIEW позволяет одновременно проводить измерения бокового и осевого давлений в режиме реального времени, отображать графические зависимости на лицевой панели прибора и сохранять экспериментальные данные в табличном формате.

Коэффициент бокового давления у пищевых масс изменяется от 0 до 1, и его численная величина зависит их состава. Так для измельченных мясopодуктов коэффициент бокового давления изменяется от 0,75 до 0,93 [3].

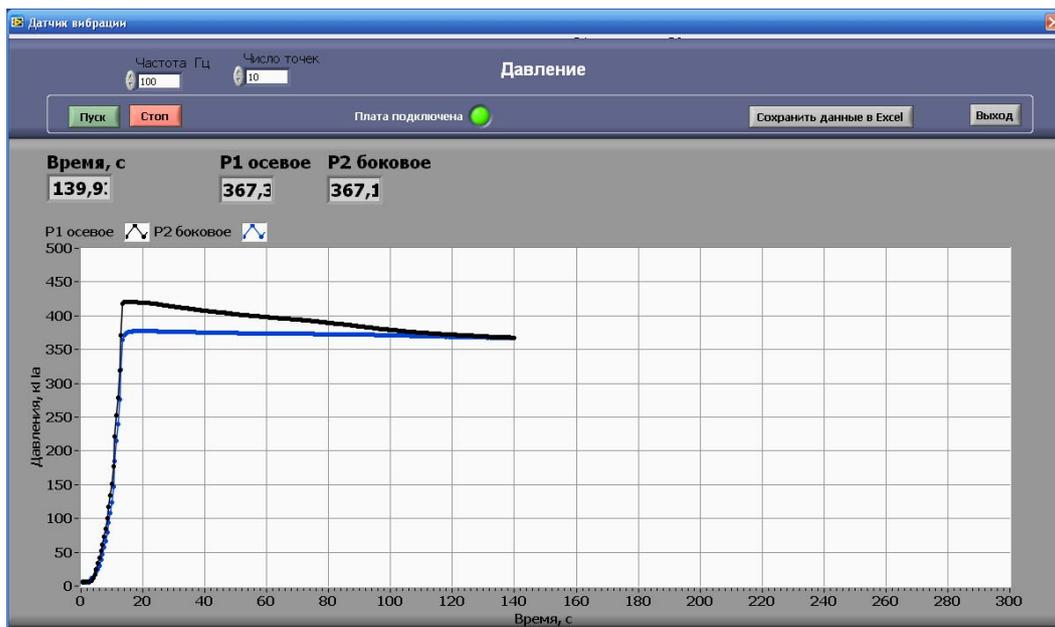
Эксперименты по исследованию коэффициента бокового давления яблочной начинки, содержащей виноградный порошок, проводили при температуре  $21,7 \pm 0,5$  °C следующим образом. Образцы яблочной начинки, с соответственным содержанием виноградного порошка в количестве 0 (контроль), 5, 10, 15 и 20% загружали в цилиндр 3 экспериментальной установки и включали виртуальный прибор для фиксирования графика измерения давлений (рис. 2). Затем вращением штурвала 1 перемещали поршень 3, создавая соответственное начальное осевое давление  $p_{oc}$  величиной от 200 до 700 кПа. После достижения осевым давлением выбранной величины начального значения положение поршня в цилиндре 3 фиксировали винтовой парой со штурвалом 1. После фиксации поршня в объеме образца с течением времени происходило выравнивание численных значений осевого и бокового давлений.

По достижении одинаковых значений осевого и бокового давлений сохраняли полученные экспериментальные данные и виртуальный прибор отключали.

Исследовали реологические свойства образцов фруктовой, в частности, яблочной начинки, применяемой для производства мучных кондитерских изделий Яблочная начинка влажностью 26% содержала 73,9 г сахара–песка и 49,3 г яблочного пюре из расчета на 100 г выхода [4].

В образцы яблочной начинки добавляли соответственное количество виноградного порошка производства ООО НПО Агропромресурс [5], (ТУ 9164 – 001 – 18419372 – 13). Образцы содержали 0% (контроль), 5%, 10%, 15%, 20% и 30% виноградного порошка.

На рисунке 4 представлена лицевая панель виртуального прибора, на которой изображен график изменения бокового и осевого давлений в зависимости от времени. График получен с образцом начинки, содержащей 5 % виноградного порошка, при этом начальное максимальное осевое давление в объеме начинки составляло  $p_{oc} = 425$  кПа.



*Рисунок 4 – График изменения бокового и осевого давлений в компьютерной системе LabVIEW*

Из графика рисунка 4 видно, что выравнивание численных значений осевого и бокового давлений произошло за период времени равный 123 с при общем времени проведения опыта равным 139,9 с, что зафиксировано на индикаторе регистрации продолжительности опыта.

Анализ экспериментальных графиков, полученных с другими образцами, позволил установить зависимость продолжительности выравнивания осевого и бокового давлений от начального давления сжатия яблочно–виноградной начинки (рис. 5).

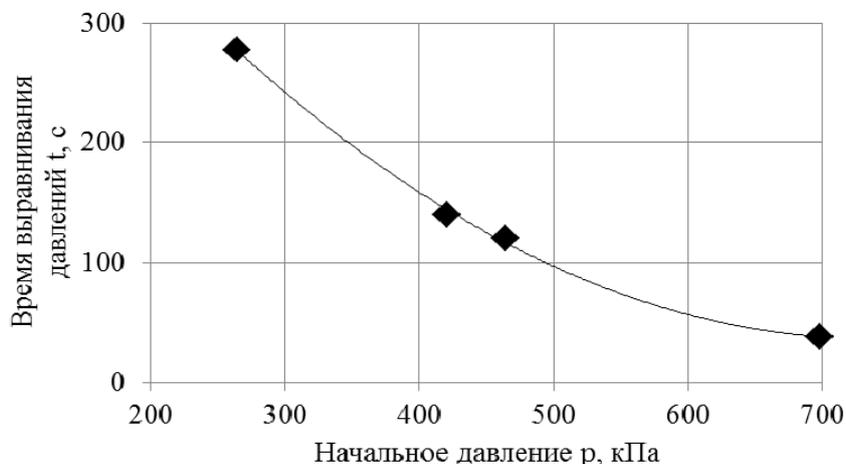


Рисунок 5 – Зависимость продолжительности выравнивания осевого и бокового давлений от начального давления сжатия яблочно–виноградной начинки (кПа)

Из рисунка 6 видно, что время, за которое осевое и боковое давления достигают одинакового значения, зависит от начального давления сжатия начинки, и при увеличении начального давления продолжительность выравнивания значений осевого и бокового давлений уменьшается по нелинейному закону. Была установлена полиномиальная зависимость продолжительности выравнивания численных значений осевого и бокового давлений от начального давления сжатия яблочно–виноградной начинки в виде:

$$t = 0,001p^2 - 1,584p + 620,1 \quad (2)$$

Продолжительность выравнивания значений осевого и бокового давления зависит также и от содержания виноградного порошка C (%) в начинке (рис. 6).

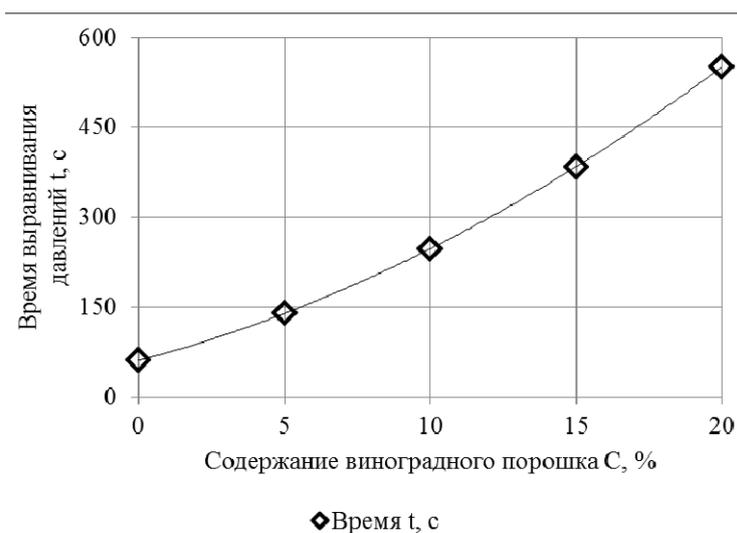


Рисунок 6 – Влияние содержания виноградного порошка C (%) в начинке на продолжительность выравнивания численных значений осевого и бокового давлений (кПа)

Из рисунка 6 видно, что увеличение содержания виноградного порошка  $C$  (%) в начинке нелинейно увеличивает время выравнивания значений осевого и бокового давлений в образцах. Зависимость времени выравнивания осевого и бокового давлений  $t$  (с) от содержания виноградного порошка  $C$  (%) имеет вид:

$$t = 0,586C^2 + 12,81C + 60,7 \quad (3)$$

Увеличение времени выравнивания значений осевого и бокового давлений в образцах в зависимости от количества виноградного порошка  $C$  (%) в начинке можно объяснить упрочнением структуры начинки, при этом, чем больше виноградного порошка, тем прочнее структура начинки и в результате необходима большая продолжительность периода выравнивания значений осевого и бокового давлений в начинке.

Зная соотношения численных значений осевого и бокового давлений в образцах в зависимости от количества виноградного порошка по формуле (1) рассчитали величину коэффициента бокового давления  $k_{бд}$  от содержания виноградного порошка.

На рисунке 7 представлен график зависимости коэффициента бокового давления  $k_{бд}$  от содержания  $C$  (%) виноградного порошка в начинке.

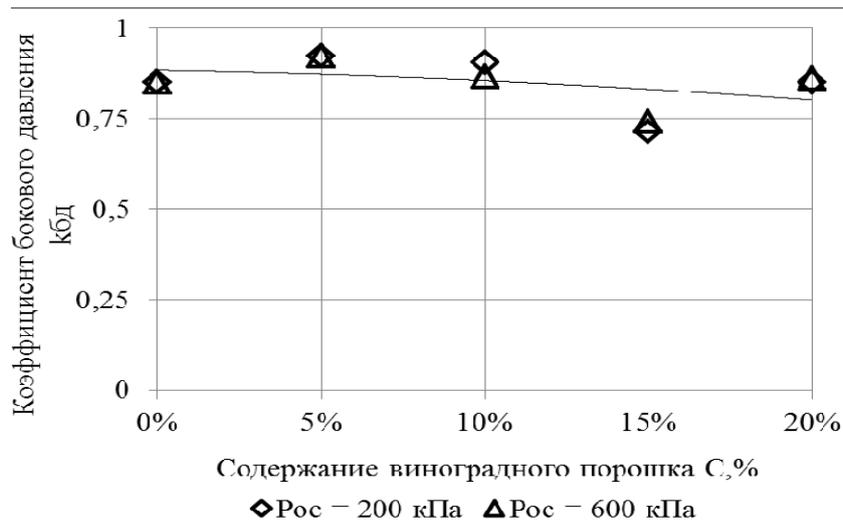


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента бокового давления  $k_{бд}$  от содержания виноградного порошка  $C$  (%) при начальных значениях осевого давления равных 200 и 600 кПа

Из рисунка 7 можно видеть нелинейное снижение значений коэффициента бокового давления  $k_{бд}$  от содержания виноградного порошка  $C$  (%), что можно объяснить уменьшением численных значений бокового давления в зависимости от увеличения содержания виноградного порошка в начинке:

$$k_{бд} = -1,302C^2 - 0,154C + 0,884 \quad (4)$$

Такое влияние содержания виноградного порошка  $C$  (%) в начинке можно объяснить снижением бокового давления в связи с упрочнением структуры начинки, что происходит при соответственном увеличении сухих веществ с ростом содержания в начинке виноградного порошка.

Таким образом, на основании анализа результатов исследований и математической обработки экспериментальных данных можно сделать следующее заключение. Проведенные исследования коэффициента бокового давления начинки для кондитерских изделий показали, что яблочная начинка с виноградным порошком проявляет неньютоновское поведение передачи давления в своем объеме, отличное от закона Паскаля. При этом, при прочих равных условиях, на величину коэффициента бокового давления оказывают нелинейное влияние такие факторы, как величина начального давления, так и содержание виноградного порошка. Установлено, что основное влияние на коэффициент бокового давления начинки для кондитерских изделий оказывает внесение порошкового компонента.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гончаровский, Д.А. Реологические свойства начинки «Шоколадная» с экструзионным кукурузным крахмалом / Д.А. Гончаровский, В.П. Корячкин // Известия ОрелГТУ. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», 2008. – № 4–4/272 (550). – С. 36–39.
2. Корячкин, В.П. Устройство для исследования коэффициента бокового давления неньютоновских сред / В.П. Корячкин, Д.Н. Алексенко // Известия ОрелГТУ. Серия «Легкая и пищевая промышленность». – Орел: ОрелГТУ, 2006. – №3–4. – С. 52 – 54.
3. Косой, В.Д. Инженерная реология биотехнологических сред / В.Д. Косой, Я.И. Виноградов, А.Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 101 с.
4. Корячкина, С.Я. Технология мучных кондитерских изделий: учебное пособие для вузов / С.Я. Корячкина. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 115 с.
5. ТУ 9164–001–18419372–13. Порошки тонкодисперсные овощные и фруктово–ягодные. Технические условия / Разработано ООО «НПО Агропромресурс». – М., 2013. – 19 с.

**Корячкин Владимир Петрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 474917  
E-mail: mapp-unpk@mail.ru

**Гончаровский Дмитрий Александрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
к.т.н., доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»  
302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65  
Тел. (4862) 551187  
E-mail: mapp-unpk@mail.ru

**Алексенко Дмитрий Николаевич**

Филиал ФГАОУ ВПО «Северо–Кавказский федеральный университет» в г. Пятигорск  
Старший преподаватель кафедры «Транспортных средств и процессов»  
357500, г. Пятигорск, просп. 40–лет Октября, д. 56  
E-mail: d.aleksenko@pgtu.ru

**Клепов Роман Евгеньевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
ассистент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»  
302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65  
Тел. (4862) 551187  
E-mail: mapp-unpk@mail.ru

---

V.P. KORYACHKIN, D.N. ALEKSENKO, D.A. GONCHAROVSKIY, R.E. KLEPOV

**STUDY OF COEFFICIENT OF LATERAL PRESSURE  
OF FRUIT FILLING FOR CONFECTIONERY PRODUCTS**

*In this paper we investigated changes of the axial and lateral pressure of the apple filling with grape powder for confectionery products; set the duration of alignment the axial and lateral pressure with the initial compression pressure; revealed the dependence of the coefficient of lateral pressure on the initial compression pressure and grape powder content in the apple filling.*

*Keywords: fruit filling, grape powder, confectionery, axial and lateral pressure, coefficient of lateral pressure.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Goncharovskiy, D.A. Rheological properties of filling "Chocolate" with extrusion corn starch / D.A. Goncharovskiy, V.P. Koryachkin // News of OrelSTU. "Fundamental and applied problems of engineering and technology", 2008. – № 4–4/272 (550). – P. 36–39.

2. Koryachkin, V.P. Device for studing of lateral pressure coefficient of non–Newtonian material / V.P. Koryachkin, D.N. Aleksenko // News OrelSTU. A series of "Light and food industry". – Orel: OrelSTU, 2006. – № 3–4. – P. 52 – 54.

3. Kosoy, V.D. Engineering rheology of biotechnological environments / V.D. Kosoi, Ya. I. Vinogradov, A.D. Malyshev. – St. Petersburg.: GIORД, 2005. – 101 p.

4. Koryachkina, S.Ya. Technology of flour confectionery products: a textbook for high schools / S.Ya. Koryachkina. – Orel: OrelSTU, 2009. – 115 p.

5. TU 9164–001–18419372–13. Poroshki tonkodispersnyye ovoshchnyye i fruktovo–yagodnyye. Tekhnicheskkiye usloviya / Razrabotano ООО «NPO Agropromresurs». – М, 2013. – 19 p.

**Koryachkin Vladimir Petovich**

FSBEI HPE “State University – Study–Science–Production Complex”

Doctor or technical science, professor, Head of department of “Machinery and apparatus of food production”

302020, Oryol, Moskovskaya st., 65

Phone: 89066640022

E-mail: mapp–unpk@mail.ru

**Dmitry Goncharov Aleksandrovich**

FSBEI HPE “State University – Study–Science–Production Complex”

Ph.D., Associate professor of department of “Machinery and apparatus of food production”

302030, Oryol, Moskovskaya st., 65

Phone: 89066640022

E-mail: mapp–unpk@mail.ru

**Aleksenko Dmitri Nikolaevich**

Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "North Caucasian Federal University" in Pyatigorsk

Senior lecturer of department of "Vehicle and processes"

357500, Pyatigorsk, 40 let Octobrya ave., 56

Tel: 89066640022

E-mail: d.aleksenko@pgtu.ru

**Klepov Roman Evgenievich**

FSBEI HPE “State University – Study–Science–Production Complex”

Assistant of department of “Machinery and apparatus of food production”

302030, Oryol, Moskovskaya st., 65

Phone: 89066640022

E-mail: mapp–unpk@mail.ru

## К ВОПРОСУ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО СИНТЕЗА ПРЯМОЛИНЕЙНО–ОГИБАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ГЛАДИЛЬНОГО ПРЕССА

*Изложена методика определения параметров приближенного прямолинейно–огibaющего механизма разработанного гладильного пресса, основанная на интерполяции функции шатунной кривой. Получены кинематические зависимости, позволяющие определить все параметры исполнительного механизма гладильного пресса, совершающего сложное движение рабочего органа.*

*Представлено описание гладильного пресса со сложным движением исполнительного органа на основе прямолинейно–огibaющего механизма, техническая новизна которого подтверждается патентом.*

**Ключевые слова:** *прямолинейно–огibaющий механизм, интерполяционный синтез, гладильный пресс.*

Представленное сегодня оборудование для влажно–тепловой обработки швейных изделий основано на исполнительных механизмах, в которых рабочие органы с плоскими поверхностями и двигаются поступательно, или образованы окружностью и двигаются вращательно. Различные типы электромеханических прессов с поступательным движением рабочего органа не обеспечивают должного усилия при минимальной мощности привода, так как работа привода неэффективно затрачивается на усилие сжатия покрытия рабочих поверхностей, упругую деформацию звеньев, преодоления сил трения в кинематических парах, которые в данном случае значительно выше, так как больше усилие прессования при том же удельном давлении [1]. Применение в конструкциях пневмо– и гидроприводов усложняет механизм и повышает его стоимость. Ротационные машины (каландры) имеют в основном узкое технологическое назначение и применимы в основном для обработки плоских изделий, а также уступают в качестве обработки гладильным прессам. Более того, их использование в быту ограничено, так как на сегодняшний день такого типа механизмы являются невостребованными, ввиду ограниченности их функций. Следует отметить, что независимо от типа применяемого привода гладильные прессы и каландры обладают достаточно высокими энергозатратами и материалоемкостью, низким КПД.

Устранить такого рода недостатки можно изменив конструкцию пресса. На рисунке 1 предлагается конструкция обжимного гладильного пресса [2], созданного на основе прямолинейно–огibaющего механизма. Такой пресс содержит раму 1, на которой жестко закреплена нижняя подушка 2 с плоской рабочей поверхностью и приводной механизм, состоящий из ведущего кривошипа 3, качающегося ползуна 4 и взаимодействующего с ними шатуна 5, на верхнем консольном конце которого жестко закреплена верхняя подушка 6 с выпуклой рабочей поверхностью, образованной дугой окружности радиуса  $R$ , проведенной из точки  $M$ , расположенной на продолжении оси шатуна 5 вверх. Положение этой точки, имеющей шатунную кривую с нижним прямолинейным участком и верхним криволинейным, определяется одним из методов синтеза симметричного конхоидального прямолинейно–направляющего механизма. Огибание верхней подушкой поверхности нижней подушки обеспечено в этом случае, при любом значении  $R$ , но из условия минимального скольжения между рабочими поверхностями подушек 2 и 6 радиус  $R$  выбирается таким, чтобы длина дуги рабочей поверхности верхней подушки 6 была равна ширине рабочей поверхности нижней подушки 2. Ширина рабочей поверхности подушки 2 не должна превышать длины прямолинейного участка шатунной кривой точки  $M$ .

Представленное конструктивно – схемное решение способствует в 2 – 2,5 раза увеличить длину прямолинейного участка шатунной кривой, и, как следствие, ширину подушки 2 без увеличения размеров приводного механизма, и решить задачу неразмыкания высшей кинематической пары, образованной поверхностями нижней 2 и верхней 6 подушек. Для этого

рабочая поверхность верхней подушки 6 укорочена по ширине и имеет хвостовик 7, продолжающий ее профиль и взаимодействующий с регулируемой по высоте неподвижной направляющей 8, продолжающей профиль плоской нижней подушки 2. Регулировка направляющей по высоте обеспечивается винтами 9, с помощью которых можно добиться необходимого усилия замыкания высшей пары 2–6.

Гладильный пресс работает следующим образом. При повороте ведущего кривошипа 3 против часовой стрелки в пределах рабочего угла  $\varphi_{p.x.}=180^\circ$  направляющая точка М движется по нижнему прямолинейному участку траектории влево, при этом вначале хвостовик 7 обкатывает направляющую 8, а затем рабочая поверхность верхней подушки 6 огибает поверхность плоской неподвижной подушки 2. При обратном ходе кривошипа подушка 6 с хвостовиком 7 откатывается в исходное положение, показанное на рисунке 1. Направляющая 8 прижимается к хвостовику 7 с помощью регулировочных винтов 9, создавая напряжение во всей кинематической цепи, вследствие чего выбираются зазоры и упругие деформации в звеньях цепи и в мягкой обшивке гладильных подушек 2 и 6, что позволяет исключить цикловые потери энергии на деформацию обшивки и звеньев и снизить приводное усилие, не снижая удельного давления прессования. Таким образом, механизм гладильного пресса функционирует в режиме замкнутой кинематической цепи с циркуляцией энергии, что возможно только в процессах обработки материалов давлением без пластической деформации. Хвостовик 7, замыкающий цепь через направляющую 8 в отведенном положении верхней подушки, позволяет сохранять напряжение даже при размыкании подушек 2 и 6.

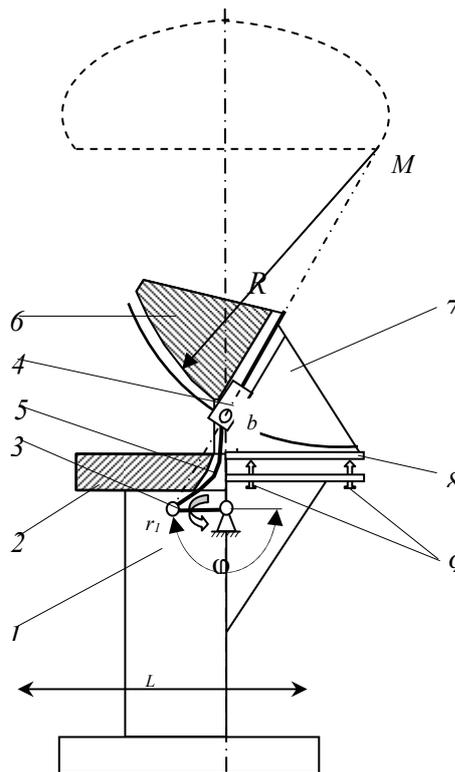


Рисунок 1 – Схема прямолинейно–огibaющего механизма гладильного пресса

В отличие от каландра представленный гладильный пресс позволяет разложить изделие на нижней плите, которая является неподвижной, что в свою очередь повышает качество обработки штучного изделия, при том, что радиус кривизны рабочей поверхности верхней подвижной подушки может достигать десятков метров, что совершенно невозможно сделать в каландре.

Синтез такого прямолинейно–огibaющего механизма гладильного пресса основан на методе интерполяции, который определяет параметры механизма из условия наилучшего приближения траектории точки М к прямой.

Известными параметрами при синтезе прямолинейно–огibaющего механизма гладильного прeсса являются длина интервала приближения  $L$ , скольжение  $\varepsilon$  между взаимогоibaемыми дуги окружности и прямой, отклонение  $\Delta_M$  траектории направляющей точки и угол поворота кривошипа  $\varphi_{p.x}$ . Неизвестными, в данном случае параметрами являются расстояние между точкой сочленения кривошипа и шатуна и направляющей точкой  $r_2$ , длина кривошипа  $r_1$ , длина шатуна  $b$ , радиус кривизны дуги  $R$  и длина огibaемого отрезка дуги  $l$ .

Параметр  $r_2$  определяется из условия минимального отклонения  $\Delta_M$  траектории направляющей точки  $M$  от прямой линии на заданном интервале, которое представляет собой разность между абсциссой точки  $M$  в начале интервала приближения и текущей абсциссой:

$$\Delta_M = r_1(1 - \cos \varphi_1) - r_2 \left( 1 - \cos \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b} \right), \quad (1)$$

где  $\varphi_1$  – текущее значение обобщенной координаты, соответствующее концу интервала приближения.

Максимальное отклонение  $\Delta_M^{\max}$  траектории движения направляющей точки  $M$  считается минимальным, если заменяющая шатунная кривая имеет с заданной прямой три общие точки – в середине интервала приближения и на его концах. Тогда приравняв к нулю уравнение (1) получим:

$$r_2 = \frac{r_1(1 - \cos \varphi_1)}{1 - \cos \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b}}.$$

Чтобы определить параметр  $r_2$  механизма гладильного прeсса, необходимо задаться начальными значениями параметров  $r_1$  и  $b$ , при известном  $\varphi_1$ .

Длину участка приближения, соответствующей длине нижней подушке гладильного прeсса, определяем по формуле:

$$L = 2 \left| r_1 \sin \varphi_1 - r_2 \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b} \right|,$$

Длина огibaемого отрезка дуги с учетом функции  $\varphi_2$  поворота шатунной плоскости механизма гладильного прeсса:

$$l = 2R \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b}.$$

Радиус  $R$  дуги окружности, образующей выпуклую поверхность верхней подушки гладильного прeсса находится из условия минимального скольжения  $\varepsilon$ , которое будет представлять разность между перемещением точки  $M$  на расстояние  $L$  и перемещением огibaющей дуги длиной  $l$  за это же время:

$$\varepsilon = L - l = 2 \left( r_1 \sin \varphi_1 \left( 1 + \frac{r_2}{b} \right) - R \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b} \right). \quad (2)$$

Приравняем это выражение к нулю и определим радиус кривизны рабочей поверхности подушки  $R$  из условия нулевого суммарного скольжения:

$$R = r_1 \sin \varphi_1 \left( 1 + \frac{r_2}{b} \right) / \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_1}{b}.$$

Однако это не означает, что отклонение и скольжение равны нулю в любой момент времени. Из уравнений (1) и (2) следует, что они равны нулю только в трех точках – в середине отрезка приближения при  $\varphi_1 = 0$  и на его краях. Для определения максимального скольжения  $\varepsilon^{\max}$ , соответствующего полученным параметрам прямолинейно–огibaющего механизма гладильного прeсса, необходимо радиус окружности подставить в уравнение функции поворота и взять производную по  $\varphi_1$  – тем самым определим аналог скорости

скольжения, который затем приравняется к нулю, откуда определяется такой угол поворота  $\varphi_1$ , при котором скольжение имеет максимальное значение.

Аналог скорости скольжения:

$$\frac{d\varepsilon}{d\varphi_1} = r_1 \cos \varphi_1 \left( 1 + \frac{r_2}{b} - \frac{R}{\sqrt{b^2 - r_1^2 \sin^2 \varphi_1}} \right).$$

Аналогичным образом определяется максимальное отклонение на интервале приближения. Аналог скорости отклонения:

$$\frac{d\Delta_M}{d\varphi_1} = r_1 \sin \varphi_1 - \frac{r_2 r_1^2 \sin \varphi_1 \cos \varphi_1}{b^2 \sqrt{1 - \frac{r_1^2 \sin^2 \varphi_1}{b^2}}}.$$

Полученные максимальные значения отклонения  $\Delta_M^{\max}$  и скольжения  $\varepsilon^{\max}$  сравниваются с заданными значениями и, в случае неудовлетворительного результата, производится итерационный процесс через выбор других значений параметров  $r_1$  и  $b$ .

Выполненный по представленной схеме прямолинейно–огibaющий механизм гладильного пресса должен иметь такие конструктивные параметры, при которых скольжение будет минимальным. Это необходимо для обеспечения качества влажно–тепловой обработки швейных изделий, иначе на ткани в процессе обработки будут образовываться складки и замины, а так же наличие скольжения может привести к механическим повреждениям (истирание, разрыв и т.п.).

Оборудование, созданное на основе прямолинейно–огibaющих механизмов, в частности разработанный гладильный пресс, позволит решить вопросы о существенном снижении энергопотребления [2], поскольку исполнительный орган прямолинейно–огibaющих механизмов образован дугой окружности, что позволяет во многих процессах перейти в область локального нагружения обрабатываемой ткани, когда контактная площадь рабочих органов пресса на протяжении всего процесса меньше самой площади неподвижной нижней подушки. Это существенно помогает снизить требуемые усилия при обработке. Более того, схема пресса позволяет создать изначальное натяжение между подушками, выбрав тем самым упругие деформации всей кинематической цепи, не затрачивая на это мощности привода.

Такой механизм пресса позволяет упростить конструкцию, повысить качество обработки изделия и КПД. Усилие прессования, в свою очередь будет зависеть не от мощности привода, а от перекрытия между взаимоогibaемыми поверхностями и толщины обрабатываемого изделия. Работа движущих сил в представленном случае затрачивается целенаправленно – на преодоление сил трения в кинематических парах, включая трение качения между рабочими поверхностями. За счет предварительного натяжения и вызванного этим эффектом «циркуляции энергии» сокращаются энергозатраты пресса в 3–5 раз и увеличивается КПД пресса.

Однако стоит отметить, что качество влажно–тепловой обработки (ВТО) материала на таком гладильном прессе будет зависеть от точности воспроизведения заданного закона движения верхней подушки. Сама же методика синтеза таких механизмов представленная в работах [3–11] позволяет добиться требуемой точности только для идеального механизма. В этой связи необходимо исследование кинематической точности прямолинейно–огibaющего механизма гладильного пресса, которое позволяет произвести оценку отклонения и скольжения действительного механизма с учетом погрешностей при изготовлении.

Таким образом, в синтезе механизма обжимного пресса наблюдается два приближения – приближенное огibaение и приближенное скольжение. При необходимости приближенное огibaение можно сделать точным, изменив профиль подушки на величину отклонения. Полностью устранить скольжение можно, лишь выполнив поверхность неподвижной плиты вогнутой по форме неподвижной центроиды, а поверхность подвижной подушки – по форме подвижной центроиды. Это значительно усложнит процесс формообразования взаи-

могибаемых поверхностей, тем более что в реальных процессах и скольжение, и отклонение можно получить в заданных допускаемых пределах.

Приведенный пример достаточно убедительно доказывает перспективность использования механизмов и устройств со сложным движением огибания в различных технологических процессах. Отличительной особенностью таких устройств является возможность целенаправленной реализации свойства интеграции нужных качеств в необходимых сочетаниях, невозможных в механизмах с простым движением выходного звена.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тихонов, А.А. Совершенствование конструкции малогабаритных гладильных прессов с целью повышения эффективности процесса влажно-тепловой обработки / А.А. Тихонов // Научный вестник южного федерального округа, 2011. – № 4 (20). – С. 42.
2. А.с. 2418121 РФ, МПК D 06 F. Гладильный пресс / С.А. Кузнецов, А.В. Владимиров, А.А. Тихонов. – 2009138214/05; заявлено 15.10.2009; опубл. 10.05.2011, Бюл. 13. – С. 2.
3. Тихонов, А.А. Экономическая эффективность применения гладильных прессов с прямолинейно – огибающим движением исполнительного органа / А.А. Тихонов, С.Н. Асланова // Модернизация экономики России: итоги и перспективы. 1-й Международный конгресс, г. Пятигорск, 2–3 ноября 2011 г. Пятигорск: РИА–КМВ, 2011. – С. 292
4. Кузнецов, С.А. Прямолинейно–огибающие механизмы. Анализ и синтез: монография / С.А. Кузнецов, А.В. Владимиров. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 139 с.
5. Кузнецов, С.А. Интерполяционный синтез механизма дробилки со сложным движением щеки / С.А. Кузнецов, А.Н. Дровников // Вопросы совершенствования машин и технологий строительной индустрии: Сб. науч. тр. – Новочеркасск, 1998. – С. 56–59.
6. Кузнецов, С.А. Интегральные механизмы индифферентной структуры. Анализ и синтез / С.А. Кузнецов, А.Н. Дровников. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. – 99 с.
7. Морозов, А.В. Кинематическая точности механизмов относительного манипулирования / А.В. Морозов, В.Л. Афонин, В.Е. Ковалев // Пробл. машиностр. и надеж. машин, 1998. – №1. – С. 61–68
8. Булатов, В.П. Основы теории точности машин и приборов / В.П. Булатов, В.А. Брагинский, Ф.И. Демин и др. – СПб.: Наука, 1993. – 232 с.
9. Правоторова, Е.А. Точность механизмов. Кинематика, динамика и точность механизмов [Справочник] / Е.А. Правоторова, В.И. Сергеев. – М.: Машиностроение, 1984. – 254 с.
10. Сергеев, В.И. Актуальные вопросы точности и параметрической надежности механических систем / В.И. Сергеев, Е.А. Правоторова // Пробл. машиностр. и надеж. машин, 1998. – №5. – С. 31–41
11. Сергеев, В.И. Исследование динамики плоских механизмов с зазорами / В.И. Сергеев, К.М. Юдин. – М.: «Наука», 1974. – 111 с.
12. Серeda В.Т. Динамические ошибки в низших кинематических парах механизмов / В.Т. Серeda // Теория механизмов и машин. – Харьков.: Изд-во Харьковского ун-та, 1971. – 121 с.

**Тихонов Андрей Александрович**

Институт сервиса и технологий, филиал ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» в г. Пятигорске  
Старший преподаватель кафедры «Сервис»  
E-mail: [andreydgtu@mail.ru](mailto:andreydgtu@mail.ru)

**Асланова Светлана Николаевна**

Институт сервиса и технологий, филиал ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» в г. Пятигорске  
Кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Сервис»  
E-mail: [svetlanaaslanova@yandex.ru](mailto:svetlanaaslanova@yandex.ru)

## ON THE PROBLEM OF INTERPOLATION SYNTHESIS OF THE RECTILINEAR ENVELOPING MECHANISM OF AN IRONER

*The authors state the methodology of determination of the parameters of the approximate rectilinear enveloping mechanism of the engineered ironing press, based on the interpolation of functions of coupler–point curve. They find some kinematic dependences allowing one to determine all the parameters of the actuator of the ironing press performing a complicated movement of the movable operating element.*

*There is the description of ironing press with a complex movement of the operating member based on rectilinear enveloping mechanism, technical novelty of which is confirmed by a patent.*

**Keywords:** *rectilinear enveloping mechanism, interpolation synthesis, ironing press.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Tikhonov, A.A. Sovershenstvovaniye konstruktssii malogabaritnykh gladil'nykh pressov s tsel'yu povysheniya effektivnosti protsessa vlazhno–teplovoy obrabotki / A.A. Tikhonov // Nauchnyy vestnik yuzhnogo federal'nogo okruga, 2011. – № 4 (20). – S. 42.
2. A.s. 2418121 RF, MPK D 06 F. Gladil'nyy press / S.A. Kuznetsov, A.V. Vladimirov, A.A. Tikhonov.. – 2009138214/05; zayavleno 15.10.2009; opubl. 10.05.2011, Byul. 13. – S. 2.
3. Tikhonov, A.A. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya gladil'nykh pressov s pryamolineyno – ogibayushchim dvizheniyem ispolnitel'nogo organa / A.A. Tikhonov, S.N. Aslanova // Modernizatsiya eko-nomiki Rossii: itogi i perspektivy. 1–y Mezhdunarodnyy kongress, g. Pyatigorsk, 2–3 noyabrya 2011 g. Pyati-gorsk: RIA–KMV, 2011. – S. 292
4. Kuznetsov, S.A. Pryamolineyno–ogibayushchiye mekhanizmy. Analiz i sintez: monografiya / S.A. Kuznetsov, A.V. Vladimirov. – Shakhty: Izd–vo YURGUES, 2007. – 139 s.
5. Kuznetsov, S.A. Interpolyatsionnyy sintez mekhanizma drobilki so slozhnym dvizheniyem shcheki / S.A. Kuznetsov, A.N. Drovnikov // Voprosy sovershenstvovaniya mashin i tekhnologiy stroitel'noy industrii: Sb.nauch.tr. – Novochoerkassk, 1998. – S. 56–59.
6. Kuznetsov, S.A. Integral'nyye mekhanizmy indifferentnoy struktury. Analiz i sintez / S.A. Kuznetsov, A.N. Drovnikov. – Novochoerkassk: YURGTU, 1999. – 99 s.
7. Morozov, A.V. Kinematicheskaya tochnosti mekhanizmov odnositel'nogo manipulirovaniya / A.V. Morozov, V.L. Afonin, V.Ye. Kovalev // Probl. mashinostr. i nadezh. mashin, 1998. – №1. – S. 61–68
8. Bulatov, V.P. Osnovy teorii tochnosti mashin i priborov / V.P. Bulatov, V.A. Braginskiy, F.I. Demin i dr. – SPb.: Nauka, 1993. – 232 s.
9. Pravotorova, Ye.A. Tochnost' mekhanizmov. Kinematika, dinamika i tochnost' mekhanizmov [Spravochnik] / Ye.A. Pravotorova, V.I. Sergeyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1984. – 254 s.
10. Sergeyev, V.I. Aktual'nyye voprosy tochnosti i parametricheskoy nadezhnosti mekhanicheskikh sistem / V.I. Sergeyev, Ye.A. Pravotorova // Probl. mashinostr. i nadezh. mashin, 1998. – №5. – S. 31–41
11. Sergeyev, V.I. Issledovaniye dinamiki ploskikh mekhanizmov s zazorami / V.I. Sergeyev, K.M. Yudin. – M.: «Nauka», 1974. – 111 s.
12. Sereda V.T. Dinamicheskkiye oshibki v nizshikh kinematicheskikh parakh mekhanizmov / V.T. Se-reda //Teoriya mekhanizmov i mashin. – KH.: Izd–vo Khar'kovsk. un–ta, 1971. – 121 s.

#### **Tikhonov Andrey Aleksandrovich**

Institute of service and technology, branch of the Federal State institute of higher education “Donskoy State Technical University”, Pyatigorsk  
Senior lecturer of the department “Service”  
E-mail: andreydgtu@mail.ru

#### **Aslanova Svetlana Nikolaevna**

Institute of service and technology, branch of the Federal State institute of higher education “Donskoy State Technical University”, Pyatigorsk  
Candidate of pedagogical Sciences, associate Professor of the department "Service"  
E-mail: svetlanaaslanova@yandex.ru

## **ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 378

М.И. РАБИНОВИЧ, Е.Ю. СТЕПАНОВА, А.И. УМАН

### **ОБ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ**

*Рассматривается спектр вопросов, касающихся проектирования рейтинговой оценки профессиональной деятельности преподавателей вуза. Организационная модель проектирования системы разработана на основе принципов системного подхода.*

**Ключевые слова:** *высшее образовательное учреждение, оценка профессиональной деятельности преподавателя, рейтинговая система, проектирование системы.*

В последние годы многие вузы Российской Федерации проводят работы по созданию, внедрению и совершенствованию систем оценки качества профессиональной деятельности преподавателей и преподавательских коллективов. Актуальность данных работ подтверждена рядом правительственных решений, определивших создание общенациональной системы оценки качества образования одной из основных задач российской образовательной политики.

По мнению О.В. Горшковой [1], оценка квалификации профессорско-преподавательского состава является одним из важнейших признаков зрелости современного университета. При этом, как указывает Е.Ю. Васильева [2], «настоятельным требованием времени становится оценка с использованием **количественных** параметров, характеризующих научно-педагогическую деятельность и - главное - не зависящих от каких-либо субъективных факторов». Это вполне объясняет возрастание интереса к вопросам, связанным с проектированием внутривузовских рейтинговых систем, наблюдаемое за последние годы в научной литературе и периодических изданиях.

Чтобы понять, насколько большое влияние оказывает организация процесса проектирования и внедрения рейтинговой системы на качество порождаемых ею рейтинговых оценок, обратимся к опыту российских образовательных учреждений. На официальных сайтах некоторых вузов, которые на данный момент уже применяют рейтинговые системы, можно найти разнообразную информацию, посвященную вопросам их разработки и функционирования. Среди этих сведений нас в первую очередь интересовали два типа документов: «Приказ о разработке и внедрении рейтинговой системы» и «Положение о рейтинговой оценке профессиональной деятельности преподавателей». Анализ этих документов позволил нам сделать вывод, что процессы проектирования и внедрения рейтинговых систем в различных вузах не содержат значимых различий и включают следующие основные этапы:

- ☐ создание рабочей группы для решения задач проектирования и внедрения внутривузовской рейтинговой системы;
- ☐ создание проекта Положения о рейтинговой оценке профессиональной деятельности преподавателей вуза;
- ☐ обсуждение проекта Положения на Ученом совете вуза;
- ☐ корректировка Положения по результатам обсуждения и его утверждение;
- ☐ выделение и передача таблиц первичных критериев оценки разработчикам базы данных и программного обеспечения;
- ☐ разработка программного обеспечения;
- ☐ апробация рейтинговой системы (в некоторых вузах);
- ☐ запуск системы в эксплуатацию.

Получив задание разработать рейтинговую систему, рабочая группа, как правило, начинает поиск информации об аналогах такой системы в подходящем по типу вузе (гуманитарном, техническом, педагогическом или другом). Как мы уже отмечали выше, подходящее Положение о рейтинговой оценке, утвержденное и положенное в основу рейтинговой системы в конкретных вузах, можно без труда найти в сети Интернет.

Изменения, вносимые рабочей группой в аналог Положения о рейтинговой оценке, чаще всего ограничиваются корректировкой списка первичных критериев оценки по его составу или значимости отдельных критериев (величин весовых коэффициентов или количества баллов, начисляемых за единицу выполненных работ). Модель расчета рейтинга и форма проведения рейтинговой оценки при этом остаются практически в неизменном виде. Именно по этой причине Положения о рейтинговой оценке во многих российских вузах очень похожи друг на друга.

Обсуждение проекта Положения вузовской общественностью и Ученым советом вуза (с последующим утверждением) также концентрируется вокруг состава и значимости критериев оценки. При этом даже не ставится вопрос о проверке корректности рейтинговой оценки, которая будет получена на основании утвержденного Положения. Это достаточно странно, поскольку свертывание разнородных сведений о работе сотрудников в единую рейтинговую оценку выполняется при помощи эмпирической функции полезности. Можно предположить, что корректность математического аппарата не ставится под сомнение по той простой причине, что за основу Положения о рейтинговой оценке был взят определенный аналог, используемый в конкретной и уже внедренной рейтинговой системе.

Так или иначе, но весь ход обсуждения и принятия Положения о рейтинговой системе настраивает разработчиков программных модулей рейтинговой системы на особое внимание к модулям, обеспечивающим различные манипуляции с таблицами исходных данных для получения рейтинговых оценок. Соответственно, гибкость рейтинговой системы отождествляется ими с наличием в ней функциональных возможностей для добавления, удаления или корректировки значимости первичных критериев оценки.

Разработанная в таком порядке рейтинговая система проходит апробацию, в процессе которой выполняется поиск и устранение ошибок в программных модулях, и улучшаются ее эргономические показатели. После этого систему запускают в эксплуатацию.

Такую схему организации разработки, внедрения и эксплуатации внутривузовской рейтинговой системы можно считать типовой для российских вузов, и она никак не учитывает возможность появления некорректных (сомнительных или даже противоречащих здравому смыслу) рейтинговых оценок, детально рассмотрению которых посвящен ряд работ [3, 4].

Некорректные рейтинговые оценки, присваиваемые системой некоторым сотрудникам, могут проявиться и, соответственно, могут быть замечены не сразу. Для осуществления их целенаправленного поиска в первую очередь необходимо, чтобы все сотрудники вуза, чья оценка предусмотрена в рейтинговой системе, ввели все необходимые сведения о своей работе. Полученные после этого списки рейтинговых оценок должны быть проверены экспертами с целью выявления сотрудников, рейтинговые оценки которых с их точки зрения завышены (или занижены).

На практике, для ускорения этого процесса, целесообразно исследовать рейтинговые оценки работников высшей квалификации (докторов наук и профессоров). В этом случае, некорректные рейтинговые оценки следует искать в верхней части рейтинг-листа, где среди хорошо известных своей активностью лиц, могут появиться фамилии сотрудников, ничем не примечательных с точки зрения руководителей вуза.

Поначалу, причиной появления таких рейтинговых оценок может считаться недобросовестность структурных подразделений вуза при подготовке исходных данных, используемых для расчета рейтинговых оценок. Если же проверка исходных данных подтвердит их достоверность, несправедливые рейтинговые оценки могут считаться следствием ошибок, допущенных при разработке программного обеспечения, и поиск причин появления таких оценок продолжается в исходных текстах программных модулей.

И только полная проверка расчета рейтингов и детальное сопоставление исходных данных и полученных рейтинговых оценок могут помочь разобраться в том, что причина некорректной рейтинговой оценки следует искать в математическом аппарате, применяемом для расчета рейтингов.

Когда истинная причина появления некорректных оценок установлена, проектировщики рейтинговой системы должны соответствующим образом модернизировать математический аппарат, используемый ими для расчета рейтинговых оценок. Сложность здесь состоит в том, что заранее неизвестно, как именно надо изменить модель расчета рейтингов, чтобы исключить возможность появления несправедливых рейтингов: Здесь необходимо проводить многочисленные эксперименты, включающие в себя изменение модели расчета рейтингов, перерасчет рейтинговых оценок и сопоставление полученных результатов друг с другом.

Однако в типовой схеме процесса разработки и внедрения рейтинговой системы предусмотрены лишь минимальные инструменты для модернизации аппарата расчета рейтингов. Сюда относятся средства изменения состава первичных критериев оценки и корректировки их весовых коэффициентов. Эти ресурсы не могут обеспечить поиск приемлемых вариантов группировки первичных критериев по видам деятельности, которая, как было показано в работе [4], необходима для получения корректной модели расчета рейтинга.

Таким образом, при использовании типовой схемы проектирования, необходимость существенно перестроить ключевой элемент рейтинговой системы (коим является модель расчета рейтинговых оценок) может возникнуть только после завершения ее проектирования и внедрения. А качественно решить такую задачу можно только в том случае, если весь необходимый для этого инструментарий был изначально предусмотрен в проекте рейтинговой системы.

Поэтому нам представляется необходимым создать модель проектирования рейтинговой системы, как отправную точку для ее практической реализации. Эта модель призвана выделить перечень обязательных модулей рейтинговой системы, описать их основные характеристики и принципы взаимодействия друг с другом, а также определить четкую последовательность и содержание этапов разработки и внедрения рейтинговой системы в вузе.

При разработке этой модели мы использовали ряд принципов системного подхода (целостность, структуризация, иерархичность системы).

Согласно принципу целостности, рейтинговую систему оценки профессиональной деятельности преподавателей вуза следует рассматривать не только как цельный объект, выполняющий закрепленные за ним функции, но и как одну из подсистем системы мониторинга работы вуза. Поскольку в основе проведения любого мониторинга лежит процесс получения необходимой для него информации, базовым элементом рейтинговой системы (который она совместно использует с другими видами мониторинга) является система сбора информации о работе сотрудников вуза.

С точки зрения принципа структуризации, проектирование рейтинговой системы не является самоцелью, а должно быть подчинено наилучшему выполнению таких задач как принятие обоснованных управляющих решений и организация стимулирования профессиональной деятельности сотрудников вуза.

И, наконец, в соответствии с принципом иерархичности, технические требования к модулям более низкого уровня иерархии формируются на основании суммарных требований модулей более высокого уровня иерархии.

Рассматривая проектирование рейтинговой системы как проектирование одного из элементов системы мониторинга работы вуза, мы тем самым получаем целый ряд практических преимуществ, проявляющихся как при разработке рейтинговой системы, так и после ее внедрения. В частности, такой подход способствует достижению эффективности и ритмичности работы тех сотрудников вуза, которые отвечают за подготовку мониторинговой информации в структурных подразделениях вуза, поскольку им более не приходится заполнять разнообразные формы отчетности, содержащие сведения, в значительной степени дублиру-

ющие друг друга. Эффективность работы обеспечивается за счет того, что все сведения о работе сотрудников вуза, которые могут потребоваться для проведения различных внутривузовских мониторингов (например, для проведения рейтинговой оценки или для заполнения различных форм отчетности), регистрируются в базе данных всегда только одни раз. Это экономит рабочее время сотрудников, поскольку все, что от них требуется – это регулярно вводить в базу данных информацию о завершении выполнения различных видов работ.

При этом ритмичность работы с информацией обеспечивается тем, что завершение регистрируемых видов работ (например, выход из печати монографий, статей и т.п.) относительно равномерно распределяется по времени в течение календарного года.

Что касается всей остальной работы с информацией (к примеру, подведение итогов работы, необходимых для определения рейтинговых оценок), то эту работу целиком берут на себя соответствующие программные модули.

Приступая к проектированию рейтинговой системы необходимо сознавать, что разработка и внедрение базовой системы сбора информации о работе сотрудников вуза должны быть полностью завершены до начала разработки математического аппарата, применяемого для расчета рейтинговых оценок. Это требование обусловлено наличием обязательной составляющей процесса проектирования рейтинговой системы - верификацией модели расчета рейтингов, которую необходимо провести на основе реальных данных о работе сотрудников вуза.

Таким образом, проектирование рейтинговой системы следует разбить на два последовательных этапа. На первом этапе создается и внедряется базовая система, позволяющая аккумулировать всю необходимую информацию, используемую для проведения различных видов внутривузовского мониторинга. Наличие такой системы позволяет в дальнейшем верифицировать различные варианты математического аппарата, используемые для получения рейтинговых оценок деятельности преподавателей вуза и, как следствие, создать рейтинговую систему, обеспечивающую корректность рейтинговых оценок.

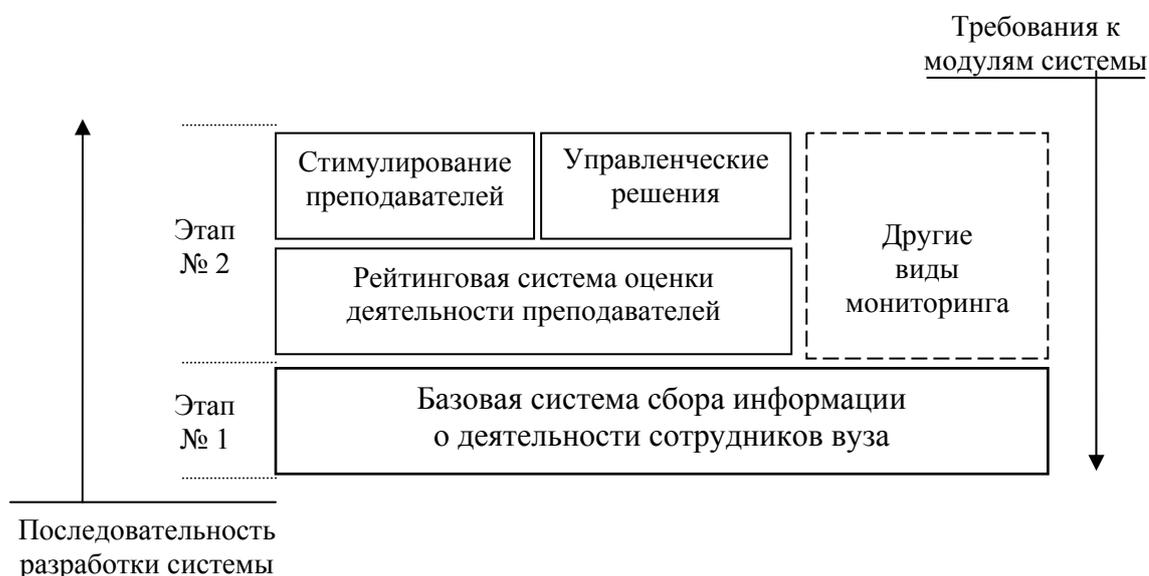
На рисунке 1 отображена организационная схема проектирования, определяющая последовательность и содержание основных этапов разработки рейтинговой системы и иллюстрирующая технологию применения принципов системного подхода к проектированию. Следует особо подчеркнуть важность положения о том, что *функциональные возможности базовой системы сбора информации должны определяться информационными потребностями систем-потребителей этой информации (принцип иерархичности)*.

Так, для решения задач рейтинговой оценки профессиональной деятельности преподавателей и осуществления других видов внутривузовского мониторинга, модули системы сбора информации должны обеспечивать:

- ∇ полноту информации о различных категориях выполняемых работ;
- ∇ возможность группировки сведений о работах по признакам, используемым в различных видах мониторинга;
- ∇ обеспечение максимальной достоверности собираемой информации;
- ∇ защиту данных от несанкционированного изменения или удаления;
- ∇ простой механизм расширения списка регистрируемых работ, облегчающий сопровождение функционирования системы.

Получив в свое распоряжение реальные данные о работе преподавателей вуза, можно переходить к проектированию и верификации математического аппарата, применяемого для расчета рейтинговых оценок. Этот процесс предполагает использование альтернативных вариантов эмпирической функции полезности, которые предположительно можно было бы применить для получения рейтинговых оценок, и последующее сравнение результатов их применения на одних и тех же наборах исходных данных. В связи с этим, модули рейтинговой системы должны обеспечить одновременное использование различных моделей расчета рейтинговых оценок и возможность сопоставления соответствующих им рейтинг-листов. Кроме того, поскольку заранее неизвестно, насколько много вариантов математического аппарата для расчета рейтинговых оценок придется опробовать прежде, чем будет найден при-

емлемый вариант, модули рейтинговой системы должны предоставлять гибкие инструменты для видоизменения схемы расчета рейтингов. Здесь нецелесообразно реализовывать каждую новую схему расчета рейтингов в виде нового программного модуля. Не столько из-за больших затрат времени на реализацию небольших изменений, сколько в связи с возможными ошибками программирования в каждом новом программном модуле. Следствием таких ошибок может стать неправильный вывод о некорректности одного из вариантов математического аппарата, который вполне можно было бы применять для расчета рейтинговых оценок.



*Рисунок 1 – Организационная схема проектирования рейтинговой системы*

Во избежание подобных коллизий, для одновременного использования различных вариантов математического аппарата для расчета рейтингов следует разработать язык описания схемы расчета рейтингов, позволяющий создавать, видоизменять и использовать в расчетах формальные описания различных схем определения рейтингов. При таком подходе расчет рейтинга по любой из альтернативных методик реализуется в одном и том же программном модуле, который осуществляет загрузку и интерпретацию формального описания методики непосредственно в процессе расчета рейтинговых оценок.

Требование формализации схемы расчета рейтинга при проектировании рейтинговой системы носит организационный характер. Оно накладывается только для обеспечения технологичности процесса верификации используемого в рейтинговой системе математического аппарата, тогда как основные требования к функциональным возможностям рейтинговой системы (рис. 1), должны формулироваться исходя из требований систем-потребителей рейтинговой информации.

Остановимся сначала на требованиях к рейтинговой системе со стороны системы материального и морального поощрения сотрудников вуза. В рассмотренных нами Положениях о внутривузовской рейтинговой оценке декларируется необходимость применения рейтинговой системы, как основы для построения системы материального поощрения сотрудников. Однако процессы проектирования этих двух систем изначально никак не взаимодействуют: сначала разрабатывается рейтинговая система, а затем ее возможности приспособляются для организации стимулирования сотрудников. С нашей точки зрения, такой подход приемлем только при использовании самых простых форм материального стимулирования, например, путем разового премирования небольшого количества лучших (по рейтингу) преподавателей по итогам учебного или календарного года. Именно такая форма стимулирования применяется в вузах, которые уже много лет применяют рейтинговые системы [5-8].

Однако в настоящее время в российских вузах существует потребность в более сложных системах стимулирования сотрудников. Ситуация изменилась после перехода с 1 декаб-

ря 2008 г. к новой системе оплаты труда в бюджетной сфере, которая значительно расширила возможности стимулирования профессиональной деятельности вузовских работников. В новых условиях рейтинговая система могла бы стать основой для создания гибкой системы распределения стимулирующей надбавки к заработной плате, охватывающей не только преподавателей, но и большинство сотрудников вуза. Для этих целей в рейтинговой системе должны быть предусмотрены соответствующие функциональных возможностей [9]. Остановимся на этом подробнее.

Современный вуз предлагает разнообразные формы обучения и достаточно часто интегрирует подготовку специалистов в различных системах образования (например, в системах высшего и среднего профессионального образования). В связи с этим преподаватели вуза различным образом задействованы при решении задач оказания образовательных услуг и, следовательно, их работа характеризуется отличающимися друг от друга наборами первичных критериев оценки.

Из этого следует: что в современных условиях для построения гибкой системы материального стимулирования, использующей в качестве входной информации сведения из внутривузовской рейтинговой системы, последняя должна быть способна отдельно оценивать результаты профессиональной деятельности различных групп сотрудников вуза и использовать при этом разные наборы первичных критериев оценки.

Кроме того, недопустимо большим является наиболее часто используемый интервал времени для пересчета рейтинговых оценок (длительностью в один календарный год). Данное ограничение (существующее в рейтинговых системах многих вузов), вводится в связи с использованием технологии сбора и подготовки исходных данных для расчета рейтинговых оценок, предполагающей анкетирование участников рейтинговой оценки.

Однако, если изменить технологию сбора и подготовки данных и использовать в основании рейтинговой системы базовую систему сбора информации о работе сотрудников вуза, то в этом случае снятие любых ограничений на длительность периода перерасчета рейтингов не встречает никаких технических трудностей.

Чтобы применение системы материального стимулирования положительным образом влияло на рост профессионального уровня всех без исключения преподавателей вуза, необходимо, чтобы справедливость оценок, выставляемых рейтинговой системой, не вызывала никаких сомнений. Здесь недостаточно разработать корректную методику расчета рейтингов. Необходимо также, чтобы любой сотрудник вуза мог проверить исходные данные для расчета рейтингов, сопоставить расчеты рейтингов у различных сотрудников и убедиться в справедливости присвоенного ему рейтинга.

Существуют и другие формы внутривузовского мониторинга, которые не связаны с построением в вузе системы материального и морального стимулирования, и которые могут проводиться с использованием рейтинговой системы (например, анализ результатов работы некоторых сотрудников вуза при принятии управленческих решений). Для их проведения в рейтинговой системе должен быть предусмотрен инструментарий, позволяющий получать выборки из рейтинг-листов, содержащие рейтинговые оценки по отдельным группам преподавателей (сотрудников) вуза или по отдельным видам их профессиональной деятельности.

Таким образом, с учетом требований систем-потребителей рейтинговой информации, модули, входящие в состав рейтинговой системы, должны обеспечивать:

- ✧ возможность создания и одновременного применения различных вариантов для методики получения рейтинговых оценок деятельности преподавателей (сотрудников) вуза;
- ✧ полностью автоматизированный расчет рейтинговых оценок, позволяющий получать ежедневные обновления текущих рейтингов субъектов оценки;
- ✧ возможность расчета рейтингов сотрудников вуза, выполняемого как с учетом их общего вклада в работу образовательного учреждения, так и по результатам их деятельности за любой ограниченный интервал времени;
- ✧ открытость процесса получения рейтинговых оценок, предусматривающая возможность контроля исходных данных для расчета рейтингов и всех промежуточных протоколов расчета;

- ✧ возможность оперативного получения сведений из таблиц рейтинговых оценок с применением комбинированных критериев выборки.

Рассмотренная нами организационная модель проектирования рейтинговой системы обеспечивает процесс ее разработки технологией, способствующей созданию эффективно действующей системы, предоставляющей корректные рейтинговые оценки. Следование этой модели позволяет решить проблему сопротивления сотрудников вуза внедрению рейтинговой системы, на серьезность которой указывается во многих работах, посвященных проектированию рейтинговых систем [1, 2, 6, 8, 10, 11]. Действительно, внедрение на первом этапе разработки рейтинговой системы ее базового компонента - системы сбора информации о работе сотрудников вуза - должно положительно восприниматься вузовской общественностью, поскольку этот компонент в значительной мере избавит работников вуза от необходимости готовить разнообразные и зачастую сходные по содержанию отчеты о своей профессиональной деятельности. К примеру, этому может способствовать автоматическая подготовка годовых отчетов по научно-исследовательской работе преподавателей, кафедр, факультетов и вуза в целом

Когда период отладки базовой системы завершится, и данные о работе сотрудников начнут регулярно регистрироваться в соответствующей базе данных, можно переходить к разработке и внедрению модулей рейтинговой системы верхнего уровня, отвечающих непосредственно за расчет рейтинговых оценок. При такой последовательности разработки исключается сама причина возникновения сопротивления внедрению рейтинговой системы, поскольку внедрение и эксплуатация модулей верхнего уровня не накладывает никаких дополнительных обязанностей на сотрудников вуза. Как следствие, внедрение рейтинговой системы может носить чисто уведомительный характер, когда преподавателей и сотрудников вуза информируют о том, что в вузе внедрена и доступна для использования рейтинговая система оценки результатов их профессиональной деятельности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшкова, О.В. Конкурс «Преподаватель года» как инструмент формирования компетенций и управления мотивацией профессорско-преподавательского состава вуза / О.В. Горшкова, О.О. Мартыненко, Л.Ю. Фалько // Университетское управление: практика и анализ. - 2008. - № 1. - С. 42 - 47.
2. Васильева, Е.Ю. Рейтинг преподавателей и кафедр в вузе / Е.Ю. Васильева // Университетское управление: практика и анализ. - 2007. - № 3. - С. 39 - 48.
3. Рабинович, М.И. О разработке типологии рейтинговых оценок деятельности преподавателей и кафедр для системы морального и материального стимулирования профессиональной деятельности / М.И. Рабинович, Е.Ю. Степанова // Университетское управление: практика и анализ. - 2009. - № 3. - С. 23 - 28.
4. Степанов, Ю.С. О проблемах получения рейтинговых оценок деятельности преподавателей, кафедр и факультетов во внутривузовской системе управления качеством образования / Ю.С. Степанов, М.И. Рабинович // Университетское управление: практика и анализ. - 2006. - № 6. - С. 53 - 57.
5. Васильева, Е.Ю. Рейтинг преподавателей, факультетов и кафедр в вузе / Е.Ю. Васильева, О.А. Граничина, С.Ю. Трапицын. - СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2007. - 159 с.
6. Новаков, И.А. Рейтинг в вузе: научно-методические основы и практика / И.А. Новаков. - Волгоград: Изд. ВолГТУ, 1999. - 102 с.
7. Фролов, В.Н. Рейтинговая оценка деятельности структурных подразделений как элемент системы мониторинга качества образования в университете / В.Н. Фролов, Э.Д. Поликарпов. - Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. - 184 с.
8. Шульгина, Т.А. Рейтинговая оценка качества научно-исследовательской и научно-методической деятельности преподавателя / Т.А. Шульгина, Г.Н. Воробьева, С.А. Хузина. - Челябинск: ООО «Издательство РЕКПОЛ», 2009. - 75 с.
9. Рабинович, М.И., Степанова Е.Ю. Использование рейтинговой системы оценки деятельности сотрудников при создании системы материального стимулирования в вузе / М.И. Рабинович, Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2013. - № 3. - С. 94 - 100.
10. Басалаева, О.Г. Проблемы внедрения рейтинговой системы оценки деятельности преподавателей / О.Г. Басалаева, Ю.М. Басалаев, А.Н. Садовой // Университетское управление: практика и анализ. - 2006. - № 2. - С. 65 - 68.
11. Васильева, Е.Ю. Подходы к оценке качества деятельности преподавателя вуза // Университетское управление: практика и анализ. - 2006. - № 2. - С. 74 - 78.

**Рабинович Марк Иосифович**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК»  
Инженер-программист  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 40  
Тел.: 9066640077  
E-mail: rabi@ostu.ru

**Степанова Елена Юрьевна**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК»  
Кандидат экономических наук, доцент  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 40  
Тел.: 9066601144  
E-mail: eco-nauka@ya.ru

**Уман Аркадий Ильич**

ФГБОУ ВПО «ОГУ»  
Доктор педагогических наук, профессор, зав. кафедрой общей педагогики  
302026, г. Орел, Комсомольская ул., 95  
Тел.: (4862)744539  
E-mail: drtex@inbox.ru

M.I. RABINOVICH, E.Y. STEPANOVA, A.I. UMAN

**ON THE ORGANIZATIONAL DESIGN MODEL RATINGS  
OF PROFESSIONAL ACTIVITY OF THE FACULTY  
OF THE GRADUATE SCHOOL**

*The range of questions, concerning design of a rating assessment of professional activity of teachers of higher education institution is considered. The organizational model of design of system is developed on the basis of the principles of system approach.*

**Keywords:** *the highest educational institution, assessment of professional activity of the teacher, rating system, system design.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Gorshkova, O.V. Konkurs «Prepodavatel' goda» kak instrument formirovaniya kompetencij i upravlenija motivaciej professorsko-prepodavatel'skogo sostava vuza / O.V. Gorshkova, O.O. Martynenko, L.Ju. Fal'ko // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. - 2008. – № 1. - S. 42 - 47.
2. Vasil'eva, E.Ju. Rejting prepodavatelej i kafedr v vuze / E.Ju. Vasil'eva // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. - 2007. - № 3. - S. 39 - 48.
3. Rabinovich, M.I. O razrabotke tipologii rejtingovyh ocenok dejatel'nosti prepodavatelej i kafedr dlja sistemy moral'nogo i material'nogo stimulirovaniya professional'noj dejatel'nosti / M.I. Rabinovich, E.Ju. Stepanova // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. - 2009. - № 3. - S. 23 - 28.
4. Stepanov, Ju.S. O problemah poluchenija rejtingovyh ocenok dejatel'nosti prepodavatelej, kafedr i fakul'tetov vo vnutrivuzovskoj sisteme upravlenija kachestvom obrazovaniya / Ju.S. Stepanov, M.I. Rabinovich // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. – 2006. - № 6. - S. 53 - 57.
5. Vasil'eva, E.Ju. Rejting prepodavatelej, fakul'tetov i kafedr v vuze / E.Ju. Vasil'eva, O.A. Granichina, S.Ju. Trapicyn. - SPb.: Izd-vo RGPU im. A.I. Gercena, 2007. - 159 s.
6. Novakov, I.A. Rejting v vuze: nauchno-metodicheskie osnovy i praktika / I.A. Novakov. - Volgograd : Izd. VolgGTU, 1999. - 102 s.
7. Frolov, V.N. Rejtingovaja ocenka dejatel'nosti strukturnyh podrazdelenij kak jelement sistemy monitoringa kachestva obrazovaniya v universitete / V.N. Frolov, Je.D. Polikarpov. - Voronezh: GOU VPO «Voronezhskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet», 2007. - 184 s.
8. Shul'gina, T.A. Rejtingovaja ocenka kachestva nauchno-issledovatel'skoj i nauchno-metodicheskoj dejatel'nosti prepodavatelja / T.A. Shul'gina, G.N. Vorob'eva, S.A. Xuzina. - Cheljabinsk: OOO «Izdatel'stvo REKPOL», 2009. – 75 s.
9. Rabinovich, M.I., Stepanova E.Ju. Ispolzovanie rejtingovoj sistemy ocenki dejatel'nosti sotrudnikov pri sozdanii sistemy material'nogo stimulirovaniya v vuze / M.I. Rabinovich, E.Ju. Stepanova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2013. - № 3. - S. 94 - 100.

10. Basalaeva, O.G. Problemy vnedrenija rejtingovoj sistemy ocenki dejatel'nosti prepodavatelej / O.G. Basalaeva, Ju.M. Basalaev, A.N. Sadovoj // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz.- 2006.- № 2.- S. 65 - 68.

11. Vasil'eva, E.Ju. Podhody k ocenke kachestva dejatel'nosti prepodavatelja vuza // Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz. - 2006. -№ 2. - S. 74 – 78.

**Rabinovich Mark Iosifovich**

State University-ESPC

Software engineer

302020, Orel, Naugorskoe sh., 40

Tel.: 9066640077

E-mail: rabi@ostu.ru

**Stepanova Elena Yurievna**

State University-ESPC

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe sh., 40

Tel. 9066601144

E-mail: eco-nauka@ya.ru

**Uman Arkady Ilyich**

Oryol state university

Doc. Ped. Sc., Prof. of the Department, chair of the general pedagogics

302026. Orel, Komsomol st., 95

Tel. (4862)744539

E-mail: drtex@inbox.ru

# **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.735.45

О.И. КУЗНЕЦОВ, В.М. СОЛДАТКИН

## **ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ФУНКЦИЙ ОПАСНОСТИ В КАНАЛАХ СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВЕРТОЛЕТА**

*Рассматриваются причины возникновения критических режимов полета вертолета, методика оценки уровня безопасности режима полета с использованием информативных функций опасности. Раскрывается связь информативных функций опасности с динамикой движения вертолета и их использования для информационной поддержки каналов системы предотвращения критических режимов.*

***Ключевые слова:** вертолет, критические режимы, система предотвращения, каналы, информационная поддержка, критерии безопасности.*

Расширение круга решаемых задач и интенсификация использования вертолетов, широкие диапазоны изменения параметров полета и условий эксплуатации неразрывно связано с проблемой безопасности полетов, повышением требований к бортовому оборудованию, обеспечивающему безопасность пилотирования в инструментальном (ручном) и автоматическом режимах.

Особенности аэродинамической компоновки и динамики полета вертолета обуславливают специфику эксплуатационных ограничений, накладываемых на критические параметры различных этапов и режимов полета, в том числе при «подхвате» вертолета, при попадании в режим «вихревого кольца», при неуправляемом самовращении вертолета на режиме висения и на взлетно-посадочных режимах [1].

Для предупреждения экипажа и предотвращения критических режимов вертолета на указанных этапах и режимах полета на борту вертолета должны быть установлены соответствующие средства, которые должны не только обеспечивать контроль текущих значений параметров движения вертолета, но и формировать их допустимые значения с учетом эксплуатационных ограничений и метеорологических условий, выдачу предупреждающих сигналов и управляющих команд-подсказок экипажу, т.е. выполнять функции информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов [2].

Анализ предельных режимов, аэродинамики и динамики полета вертолета [3, 4], показывает, что основные критические режимы вертолета связаны с: прочностью элементов конструкции – при превышении максимально-допустимой приборной скорости; режимом обтекания несущего винта, при котором его коэффициент режима работы приближается к максимально-допустимому значению; превышением максимально-допустимого значения числа Маха конца наступающей лопасти и возрастанием волнового сопротивления несущего винта; возникновением режима «вихревое кольцо», приводящим к пульсациям и срыву потока с лопасти; превышением летных ограничений по максимально-допустимой несущей способности несущего винта, связанных с режимом обтекания и срывом потока с отступающей лопасти; возникновением недопустимого с точки зрения безопасности явления «подхвата» при маневрировании вертолета с большими вертикальными перегрузками.

Как показано в работе [5], летные ограничения на характерные для каждого критического режима параметры полета вертолета определяются граничными значениями характерных параметров  $x_{\text{гpi}}$ , превышение которых приводит к возникновению одной из регламентируемых Нормами летной годности вертолетов (НЛГВ) особой (нештатной) ситуации  $H_i$  [6]: усложнению условий полета (УУП), сложной (СС), аварийной (АС) и катастрофической

(КС) ситуациям.

Определяющим признаком возникновения каждой из особых ситуаций  $H_k$  на всех этапах полета вертолета от взлета до посадки, на режимах снижения и висения является превышение характерных параметров  $x_i$  известных для данного типа вертолета эксплуатационных ограничений  $x_{гр i}$ .

При построении систем предупреждения и предотвращения критических режимов самолетов и вертолетов принято выделять следующие характерные значения параметров  $x_i$ , определяющих уровень опасности штатных режимов полета [2]:  $x_{iн}$  – номинальное значение параметра  $x_i$ , соответствующее нормальному (с точки зрения безопасности) эксплуатационному режиму полета;  $x_{iп}$  – пороговое значение, соответствующее уровню срабатывания сигнализации и свидетельствующее о выходе параметра  $x_i$  в зону УУП;  $x_{i доп}$  – допустимое значение параметра, соответствующее границе перехода от УУП к СС;  $x_{i пред}$  – предельное (опасное) значение параметра, выход за границы которого является причиной возникновения АС;  $x_{i кр}$  – критическое значение параметра, превышение которого с вероятностью близкой к единице приводит к возникновению катастрофической ситуации.

Тогда при полете вертолета каждая из особых ситуаций  $H_k$ , обусловленная изменением характерного параметра  $x_i$ , может быть идентифицирована следующими уравнениями [2]:

- катастрофическая ситуация:  $x_i \geq x_{i кр}$  и  $P_{оп}^{x_i} = 1$ ;
- аварийная ситуация:  $x_{i кр} > x_i \geq x_{i пред}$  и  $10^{-2} \leq P_{оп}^{x_i} < 1$ ;
- сложная ситуация:  $x_{i пред} > x_i \geq x_{i доп}$  и  $10^{-4} \leq P_{оп}^{x_i} < 10^{-2}$ ;
- усложнение условий полета:  $x_{i доп} > x_i \geq x_{i п}$  и  $10^{-6} \leq P_{оп}^{x_i} < 10^{-4}$ ;
- нормальные эксплуатационные условия:  $x_i < x_{i н}$  и  $10^{-9} \leq P_{оп}^{x_i} < 10^{-6}$ ,

где  $P_{оп}^{x_i}$  – вероятность возникновения катастрофической ситуации при данном значении параметра  $x_i$ , характеризующая уровень опасности данного режима полета по параметру  $x_i$ .

Так как на границах особых ситуаций  $H_k$  связь значений  $x_{i гр}^{H_i}$  параметра  $x_i$  и вероятностного показателя  $P_{оп}^{x_i}$  опасности режима полета вертолета однозначна, то по граничным точкам  $x_{i гр}^{H_k}$  может быть построена детерминированная для данного типа вертолета непрерывная информативная функция опасности [7]:

$$F_{оп}^{x_i} = f(x_i), \quad (1)$$

которая однозначно характеризует изменение уровня безопасности полета вертолета при изменении параметра  $x_i$ .

При нормальных эксплуатационных условиях полета частная информативная функция опасности по  $x_i$  параметру полета будет изменяться в интервале  $0 \leq F_{оп}^{x_i} < F_{оп}^{x_k УУП}$ .

При переходе особой ситуации  $H_i$  из зоны УУП до зоны СС, от СС до АС и от АС до КС информативная функция  $F_{оп}$  будет соответственно изменяться в интервалах

$$F_{оп}^{x_k УУП} \leq F_{оп}^{x_i} < F_{оп}^{x_k СС}; \quad F_{оп}^{x_k СС} \leq F_{оп}^{x_i} < F_{оп}^{x_k АС}; \quad F_{оп}^{x_k АС} \leq F_{оп}^{x_i} < F_{оп}^{x_k КС}.$$

При построении частной информативной функции  $F_{оп}^{x_i}$  опасности полета вертолета, обусловленной изменением характерного параметра  $x_i$ , принималось допущение, что другие параметры движения вертолета находятся в пределах эксплуатационной области и не вносят заметного влияния на изменение вероятностного показателя опасности  $P_{оп}^{x_i}$ . При приближении к эксплуатационным ограничениям нескольких характерных параметров  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) уровень опасности режима полета вертолета в целом может быть оценен условной вероятностью

$$P_{\text{оп}}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{оп}}^{x_i}),$$

в соответствии с которой может быть построена интегральная информативная функция  $F_{\text{оп}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , определяющая текущий уровень опасности режима полета вертолета в целом, вида

$$F_{\text{оп}}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{\text{оп}}^{x_i}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - f(x_i)].$$

Так как характерные параметры  $x_i$  на каждом режиме полета взаимосвязаны через динамику движения вертолета, то указанные связи учитываются и в полученных частных и интегральной информативных функциях опасности.

Пусть уравнения управляемого движения вертолета на данном режиме полета известны и имеют вид [2]

$$\frac{dx_i}{dt} = \varphi_i(x_0, U_j, W_k, t) \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, l},$$

где  $x_i$  – фазовые координаты вектора состояния  $\mathbf{X}$  вертолета;

$U_j$  – параметры вектора управления  $\mathbf{U}$ ;

$W_k$  – параметры вектора внешнего воздействия  $\mathbf{W}$ ;

$t$  – время.

Принимая, что координаты  $x_i$ , а следовательно, и информативные функции опасности  $F_{\text{оп}}^{x_i}$  – непрерывно дифференцируемые функции времени с учетом (1) будем иметь

$$\frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \varphi_k(x_i, U_j, W_k, t), \quad (2)$$

$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, l}.$

Аналогично для интегральной информативной функции опасности режима полета, получим:

$$\frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt} = \sum_{k,i=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt} = \sum_{k,i=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \varphi_k(x_i, U_j, W_k, t). \quad (3)$$

Полученные уравнения (2), (3) устанавливают связь между динамикой движения вертолета и динамикой изменения уровня безопасности полета. Элементы  $\frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}}$  и  $\frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k}$  квадратной матрицы Якоби в каждый момент времени характеризуют степень влияния изменений частных информативных функций опасности  $F_{\text{оп}}^{x_i}$  и параметров траекторного движения  $x_i$  на изменение уровня безопасности режима полета в целом.

Уравнение (3) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{dF_{\text{оп}}}{dt} &= \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_k} \varphi_k(x_i, U_j, W_k, t) = \\ &= \overline{\text{grad}} F_{\text{оп}} \frac{dx}{dt} = \overline{\text{grad}} F_{\text{оп}} \overline{V}(X, U, W, t) = \left| \overline{\text{grad}} F_{\text{оп}} \right| \left| \overline{V}(X, U, W, t) \right| \cdot \cos \varphi, \end{aligned}$$

где  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}$  – вектор градиента интегральной информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}$  текущего режима полета вертолета;

$\frac{dx}{dt} = \overline{V}(X, U, W, t)$  – вектор обобщенной фазовой скорости вертолета как объекта управления;

$\varphi$  – угол между векторами  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}$  и  $\overline{V}(X, U, W, t)$ .

Если в момент времени  $t$   $\frac{dF_{\text{оп}}}{dt} > 0$ , это означает, что информативная функция опасности  $F_{\text{оп}}(t)$  возрастает (уровень безопасности полета снижается), вектор  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}$  направлен в сторону наибольшего роста функции  $F_{\text{оп}}(t)$  и составляет с вектором фазовой скорости  $\frac{dx}{dt}$  угол  $\varphi$ , находящийся в пределах  $0 < \varphi < \pi/2$ . Отсюда вытекает естественная возможность учета характера изменения интегральной информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}(t)$  при обнаружении и прогнозирования особых ситуаций, при построении управления, обеспечивающего заданный уровень безопасности полета, которому будет соответствовать допустимое эксплуатационное значение  $F_{\text{оп}}^{\text{э}}$  информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}(t)$ .

В общем случае интегральная информативная функция опасности текущего режима полета вертолета является функцией многих переменных, т.е.  $F_{\text{оп}} = F_{\text{оп}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Однако, как показано в работе [5], для большинства критических режимов полета вертолета их возникновение определяется лишь несколькими (в основном двумя, тремя) характерными параметрами движения вертолета.

Если информативная функция опасности режима полета  $F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  зависит от трех параметров, то при построении поверхности изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  целесообразно задать ее в параметрической форме:

$$\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3) = \bar{r}(U, V) = \bar{F}_{\text{оп}}^{x_1}(U, V)\bar{i} + \bar{F}_{\text{оп}}^{x_2}(U, V)\bar{j} + \bar{F}_{\text{оп}}^{x_3}(U, V)\bar{k},$$

где  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  – единичные векторы.

Тогда, выбирая диапазон изменения новых переменных  $0 \leq U \leq 1, 0 \leq V \leq 1$ , можно получить уравнения граничных кривых, которые делят поверхность изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  на совокупности технологически прямоугольных частей, каждая из которых ограничена парой  $U$ -кривых и парой  $V$ -кривых:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{r}(0, V) \\ \bar{r}(1, V) \end{array} \right\} V\text{-кривые}; \quad \left. \begin{array}{l} \bar{r}(U, 0) \\ \bar{r}(U, 1) \end{array} \right\} U\text{-кривые}.$$

Так как переменные  $U$  и  $V$  изменяются в пределах от 0 до 1 вдоль соответствующих границ, то вектор  $\bar{r}(U, V), 0 \leq U \leq 1, 0 \leq V \leq 1$  представляет собой внутреннюю часть поверхности изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$ , а  $\bar{r}(U, 0), \bar{r}(1, V), \bar{r}(0, V), \bar{r}(U, 1)$  – четыре известные граничные кривые этой поверхности. В этом случае формализация и построение поверхности изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  сводится к нахождению функции  $\bar{r}(U, V)$ , которая при  $U=0, U=1, V=0, V=1$  представляет нужную граничную кривую этой поверхности. Для случая, если заданы только две границы  $\bar{r}(1, V), \bar{r}(0, V)$ , применяя линейную интерполяцию в  $U$  и  $V$  направлениях, можно получить линейную поверхность изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  вида

$$\bar{r}_1(U, V) = (1-U)\bar{r}(0, V) + U\bar{r}(1, V); \quad \bar{r}_2(U, V) = (1-V)\bar{r}(U, 0) + V\bar{r}(U, 1).$$

Вектор  $\bar{r}_1 + \bar{r}_2$  представляет собой часть поверхности изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$ , каждая из границ которой является суммой

$$\bar{r}(U, 0) + [(1-U)\bar{r}(0, 0) + U\bar{r}(1, 0)].$$

Если далее найти часть поверхности  $\bar{r}_3(U, V)$ , границами которой служат прямоугольные отрезки

$$\bar{r}_3(U, V) = (1-U)(1-V)\bar{r}(0, 0) + U(1-V)\bar{r}(1, 0) + (1-U)V\bar{r}(0, 1) + UV\bar{r}(1, 1),$$

то вектор  $\bar{r} = \bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3$ , определяющий поверхность изменения вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$

может быть представлен в следующей матричной форме:

$$\begin{aligned} \bar{r}(U, V) = & [(1-U)U] \begin{bmatrix} \bar{r}(0, V) \\ \bar{r}(1, V) \end{bmatrix} + \bar{r}(U, 0)\bar{r}(U, 1) \begin{bmatrix} 1-V \\ V \end{bmatrix} - \\ & - [(1-U)U] \begin{bmatrix} \bar{r}(0, 0) & \bar{r}(0, 1) \\ \bar{r}(1, 0) & \bar{r}(1, 1) \end{bmatrix} \frac{1-V}{V}. \end{aligned}$$

Используя рассмотренную методику, вектор  $\overline{grad} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3)$  можно представить в виде

$$\overline{grad} F_{\text{оп}}(x_1, x_2, x_3) = \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_1} \bar{i} + \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_2} \bar{j} + \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_3} \bar{k}.$$

В качестве дополнительной информации можно получить выражение для полной производной интегральной информативной функции опасности режима полета вертолета в виде

$$\frac{dF_{\text{оп}}}{dt} = \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_2} \frac{dx_2}{dt} + \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_3} \frac{dx_3}{dt}. \quad (4)$$

С учетом того, что в процессе вывода вертолета из зоны особых ситуаций можно принять, что значения  $\frac{dF_{\text{оп}}}{dx_1}$ ,  $\frac{dF_{\text{оп}}}{dx_2}$  и  $\frac{dF_{\text{оп}}}{dx_3}$  изменяются незначительно, то из соотношения (4)

можно определить требуемые темпы изменения  $\frac{dx_1}{dt}$ ,  $\frac{dx_2}{dt}$ ,  $\frac{dx_3}{dt}$  фазовых координат  $x_1, x_2, x_3$  вертолета, а следовательно скорости изменения соответствующих органов управления по параметрам  $x_1, x_2, x_3$ , необходимые для быстрого вывода вертолета, из возникшей особой ситуации, понижения уровня ее опасности режима полета и выполнении условия  $\frac{dF_{\text{оп}}}{dt} < 0$ .

Для иллюстрации возможности использования интегральной информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}(t)$  и вектора  $\overline{grad} F_{\text{оп}}$  в каналах информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов вертолета рассмотрим режим вертикального снижения вертолета с малыми продольными и боковыми воздушными скоростями, при котором возможно возникновение режима «вихревое кольцо».

Границы летных ограничений на режиме «вихревое кольцо» определяются выражением вида [5]

$$V_{y\text{гр}} = V_{vy} + k_x \delta_x V_{vx} + k_z \delta_z V_{vz},$$

где  $V_{vx}, V_{vy}, V_{vz}$  – продольная, вертикальная и боковая составляющие вектора  $\bar{V}_v$  истинной воздушной скорости вертолета;

$V_y$  – вертикальная скорость снижения вертолета;

$\delta_x, \delta_z$  – перемещения ручки циклического шага при продольном и боковом управлении;

$k_x, k_z$  – постоянные коэффициенты.

На рисунке 1 в координатах вертикальной скорости  $V_y$  и горизонтальной воздушной скорости  $V_{xz} = \sqrt{V_{vx}^2 + V_{vz}^2}$  для различных особых ситуаций  $H_i$  режима «вихревое кольцо» построены линии одинакового уровня информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}} = \text{const}$  и траектория изменения функции  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  при движении вертолета [7]. В каждой точке траектории изменения интегральной информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  можно построить вектор  $\overline{grad} F_{\text{оп}}^{\text{БК}}$  (линии нормали к соответствующей кривой равной опасности), который будет указывать направление наибольшего роста функции  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(V_y, V_{xz})$ .

Как видно из рисунка 1, в точке 1 направления вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}^{\text{БК}}$  и производной  $dF_{\text{оп}}^{\text{БК}}/dt$  практически совпадают, что указывает на ожидаемое возрастание функции  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  и снижение уровня безопасности полета вертолета. В точке 2 обобщенная информативная функция опасности достигает своего наибольшего значения, при этом вектор  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}^{\text{БК}}$  ортогонален производной  $dF_{\text{оп}}^{\text{БК}}/dt$ . При дальнейшем движении вертолета производная  $dF_{\text{оп}}^{\text{БК}}/dt$  становится отрицательной, что свидетельствует об уменьшении интегральной функции опасности  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  до значения, равного в точке 3  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}} \approx 10^{-9}$  и, соответствующем нормальным эксплуатационным условиям полета вертолета.

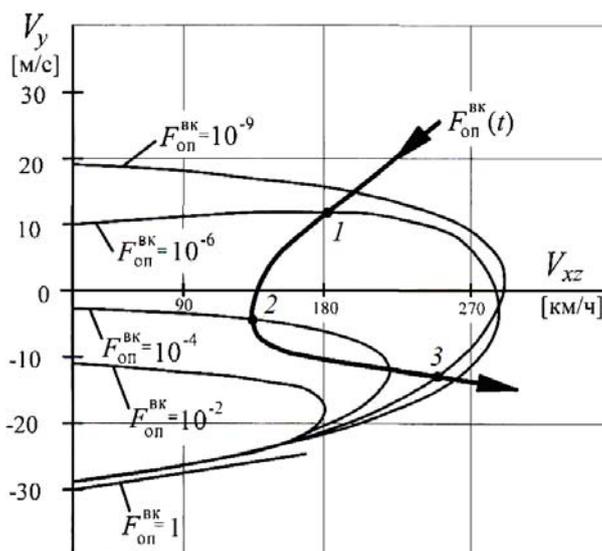


Рисунок 1 – Иллюстрация кривых равной опасности, траектория изменения и градиент интегральной информативной функции опасности режима «вихревое кольцо» (1, 2, 3 – характерные точки кривой применения интегральной функции опасности)

Таким образом, в каждый момент времени информация о значении интегральной информативной функции опасности  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  и его положении на соответствующей линии уровня равной опасности позволяет указать направление, противоположное значению вектора  $\overline{\text{grad}} F_{\text{оп}}^{\text{БК}}$  в данной точке, определяющее характер изменения параметров движения вертолета  $V_y$  и  $V_{xz}$ , при котором уменьшение информативной функции  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  и повышение уровня безопасности критического режима, например «вихревое кольцо» будут происходить наиболее быстрым темпом, формировать эффективное управление по выводу вертолета из нештатной ситуации.

При построении алгоритма предупреждения о выходе на границы регламентируемого уровня безопасности полета по критическому параметру  $x_i$ , воспользуемся подходом построения упреждающей сигнализации [2]. Тогда порог срабатывания  $F_{\text{оп.пр}}^{x_i}$  канала предупреждения будет определяться как

$$F_{\text{оп.пр}}^{x_i} = F_{\text{оп}}^{\text{эк}} - \Delta F_{\text{оп.ст}}^{x_i} - Q_{\text{оп}}^{x_i} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dt},$$

где  $F_{\text{оп}}^{\text{эк}}$  – регламентируемое НЛГВ ограничение на допустимый уровень опасности полета по критическому параметру  $x_i$ ;

$\Delta F_{\text{оп.ст}}^{x_i}$  – статический запас, учитывающий точность измерения критического параметра

$x_i$  и других фазовых координат  $x_j$ , используемых при построении функции опасности  $F_{\text{оп}}^{x_i}$ ;

$Q_{\text{оп}}^{x_i}$  – динамическое упреждение, определяемое динамическими свойствами канала управления по параметру  $x_i$ .

Используя связь (1) частной информативной функции опасности режима полета вертолета с фазовыми координатами  $x_i$  и  $x_j$  вида  $F_{\text{оп}}^{x_i} = f_i(x_i, x_j)$ , получим соотношение для определения величин статического упреждения  $F_{\text{оп.ст}}^{x_i} = f_i(\Delta x_i, \Delta x_j)$ , где  $\Delta x_i$  и  $\Delta x_j$  – возможные суммарные погрешности измерения фазовых координат  $x_i$  и  $x_j$ . При известном времени  $T_{xi}$  регулирования канала управления вертолета по критическому параметру  $x_i$  динамическое упреждение  $Q_{\text{оп}}^{x_i}$  можно представить в виде

$$Q_{\text{оп}}^{x_i} = T_{xi} \left( \frac{df_i}{dx_i} \right)_{\max x_i}.$$

Полученные значения  $\Delta F_{\text{оп.ст}}^{x_i}$  и  $Q_{\text{оп}}^{x_i}$  являются исходными для построения алгоритма работы канала предупреждения критических режимов вертолета на любом режиме

$$F_{\text{оп.пр}} = F_{\text{оп}}^{\exists} - \Delta F_{\text{оп.ст}} - Q \frac{dF_{\text{оп}}}{dt},$$

где  $\Delta F_{\text{оп.ст}}$  и  $Q$  – соответственно статическое и динамическое упреждения.

Используя связи частных и интегральной информативных функций опасности критического режима полета и их производных вида

$$\frac{dF_{\text{оп}}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt} = \sum_{k,i=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} \frac{dx_k}{dt},$$

получим соотношения для статического и динамического упреждений

$$\Delta F_{\text{оп.ст}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Delta F_{\text{оп.ст}}^{x_i}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - f_i(\Delta x_i, \Delta x_j)];$$

$$Q = \sum_{k,i=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} Q_{\text{оп}}^{x_k} = \sum_{k,i=1}^n \frac{dF_{\text{оп}}}{dF_{\text{оп}}^{x_i}} \frac{dF_{\text{оп}}^{x_i}}{dx_k} T_{xk} \left( \frac{df_k}{dx_k} \right)_{\max},$$

где  $T_{xi}$  – время переходного процесса канала управления вертолета по параметру  $x_k$ .

При выходе фазовой координаты  $x_n$  в момент времени  $t_j$  за пределы эксплуатационных ограничений частная информативная функция опасности режима полета вертолета  $F_{\text{оп}}^{x_n}(x(t_j)) > F_{\text{оп}}^{\exists x_i}$  выходит за границы регламентируемого уровня опасности  $F_{\text{оп}}^{\exists x_i}$ . При построении управления  $U$  по критерию безопасности в следующий момент времени  $t$  параметры полета  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  должны изменяться таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$\frac{dF_{\text{оп}}^{x_n}(x(t))}{dt} < 0, \quad t_j < t < t_{j+1}; F_{\text{оп}}^{x_i}(x_i(t)) < F_{\text{оп}}^{\exists x_i}(x_i(t)), \quad i = \overline{1, n-1}; \frac{dF_{\text{оп}}}{dt} < 0.$$

Первое неравенство обеспечивает уменьшение во времени информативной функции  $F_{\text{оп}}^{x_n}(x_i(t))$ , значение которой вышло за эксплуатационное ограничение  $F_{\text{оп}}^{\exists x_n}$ . Второе неравенство означает условие невыхода остальных  $n-1$  информативных функций  $F_{\text{оп}}^{x_i}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$  за пределы эксплуатационных ограничений  $F_{\text{оп}}^{\exists x_i}$  данного режима полета. Третье неравенство обеспечивает невозрастание интегральной функции опасности  $F_{\text{оп}}$  критического режима в целом. Поскольку функции  $F_{\text{оп}}^{x_i}$  и  $F_{\text{оп}}$  являются известными для конкретного критического режима полета вертолета, то полученная система алгебраических неравенств упрощает син-

тез управления вертолета по выводу из возникшей нештатной ситуации в реальном масштабе времени.

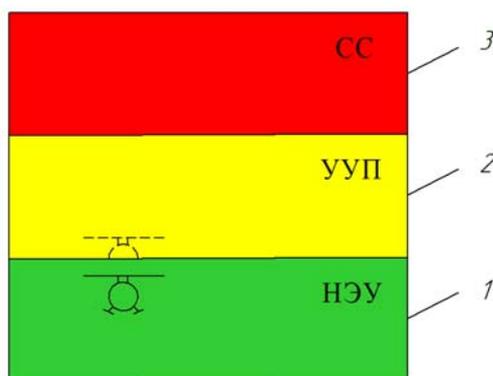
Если в момент времени  $t$  за эксплуатационные ограничения вышли несколько, например,  $r$  информативных функций опасности  $F_{\text{оп}}^{x_i}$ , то дальнейшее управление движением вертолета должно происходить так, чтобы выполнялись условия

$$\frac{dF_{\text{оп}}^{x_{n-r+i}}}{dt} < 0, \quad r \leq n; \quad F_{\text{оп}}^{x_i} \leq F_{\text{оп}}^{\text{э}x_i}; \quad i = \overline{1, n-r}, \quad F_{\text{оп}} < F_{\text{оп}}^{\text{э}},$$

где  $F_{\text{оп}}^{\text{э}}$  – допустимое эксплуатационное значение интегральной функции опасности критического режима вертолета, соответствующее регламентируемому НЛГВ уровню безопасности полета.

Если линии уровня равной опасности  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}} = \text{const}$  и траекторию изменения функции  $F_{\text{оп}}^{\text{БК}}(t)$  представить в качестве визуальной и директорной информации при пилотировании вертолета, то она может служить дополнительным и наглядным указанием пилоту – как управлять вертолетом в данный момент времени, возможно ли с учетом возможностей (запасов) управления по критическим параметрам  $x_i$  и  $x_j$  обеспечить заданный уровень безопасности полета в дальнейшем, как понизить уровень опасности возникающей особой ситуации.

Например, для информационной поддержки экипажа вертолета в возникающих нештатных ситуациях предлагается традиционную систему отображения информации дополнить кадром индикатора безопасности, который может быть реализован на информационном табло системы экранной индикации (СЭИ), например, в виде информационного поля с тремя зонами – зеленого, желтого и красного цветов (рис. 2).



**Рисунок 2 – Иллюстрация одного из вариантов реализации индикатора безопасности режима полета вертолета на информационном табло СЭИ (1, 2 и 3 – зоны зеленого, желтого и красного цвета)**

В одной из зон силуэтом вертолета черного цвета непрерывно отображается относительное положение уровня опасности  $F_{\text{оп}}$  текущего режима полета. Проблесковым (мигающим) световым силуэтом вертолета отображается изменение уровня опасности режима полета на прогнозируемом интервале времени. Зона 1 зеленого цвета соответствует уровню нормальным эксплуатационным условиям (НЭУ) полета, зона 2 желтого цвета характеризует снижение уровня безопасности и возникновению усложненных условий полета (УУП), зона 3 красного цвета определяет попадание вертолета в сложную ситуацию (СС), когда уровень безопасности полета соответствует докритическому режиму полета. Границы зон указывают на попадание вертолета в особую (нштатную) ситуацию, соответствующую местоположению непрерывного и проблескового силуэтов вертолета. При приближении непрерывного высвечивания черного силуэта вертолета к границе особой ситуации (УУП или СС) дополнительно к информационному полю индикатора безопасности на экране СЭИ формируется дополнительная информация о текущих и прогнозируемых значениях интегральной информативной функции опасности режима полета вертолета, а также целевые команды-подсказки содействия экипажа по

эффективному выводу вертолета из возникающей особой ситуации, например, «Уменьшить вертикальную скорость», «Увеличить продольную скорость» и т.п. Для большей достоверности предупреждения экипажа о приближении особой ситуации при пересечении проблесковых силуэтов вертолета границ особых ситуаций автоматически срабатывает канал упреждающей сигнализации (звуковой, световой или тактильный), на который должна быть обеспечена соответствующая реакция экипажа при штурвальном управлении вертолетом.

Рассмотренные частные и интегральная информативные функции опасности режима полета вертолета, полная производная и градиент изменения интегральной информативной функции опасности по характерным параметрам конкретного критического режима полета учитывают регламентируемые НЛГВ уровни опасности и вероятности возникновения той или иной особой ситуации, отражают динамику полета вертолета и вызываемое ею изменение уровня опасности режима полета, позволяют решать задачи обнаружения, предупреждения и управления по предотвращению критических режимов полета вертолета, решать задачи информационной поддержки экипажа в особых ситуациях.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Володко, А.М. Безопасность полетов вертолетов / А.М. Володко. – М.: Транспорт, 1981. – 342 с.
2. Солдаткин, В.М. Методы и средства построения бортовых информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 350 с.
3. Браверманн, А.С. Динамика вертолета: Предельные режимы полета / А.С. Браверманн, А.П. Вайнтруб – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
4. Петросян, Э.А. Аэродинамика соосного вертолета: балансировка, устойчивость, управление, маневрирование, автоматическая стабилизация и управление / Э.А. Петросян. – М.: Полигон-Пресс, 2004. – 816 с.
5. Деревянкин, В.П. Особенности системы предупреждения критических режимов полета вертолета / В.П. Деревянкин, О.О. Кузнецов, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. – № 3. – С. 51-55.
6. Нормы летной годности гражданских вертолетов. – М.: ЦАГИ, 1987. – 350 с.
7. Кузнецов, О.И. Синтез информативных функций опасности критических режимов полета вертолета / О.И. Кузнецов, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2013. – № 3. – С. 50-56.

**Кузнецов Олег Игоревич**

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ), Казань

Аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

420079, г. Казань, ул. Приволжская, д. 171 А

тел. +79872908148

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Владимир Михайлович**

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ), Казань

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы» (ПИИС)

420079, г. Казань, ул. Приволжская, д. 171 А

тел. +79872908148

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

---

O.I. KUZNETSOV, V.M. SOLDATKIN

## **CONSTRUCTION AND USE OF THE INFORMATIVE FUNCTIONS OF DANGER FORMATION SIGNALS OF THE INFORMATIONAL SUPPORT OF CHANNELS SYSTEM PREVENT CRITICAL REGIMES OF THE HELICOPTER**

*Discusses the causes origin of critical regimes of flight helicopter's, the method assessment*

*of level safety the flight mode's by using the informing functions of danger. Link to informing functions of danger to the dynamics of movement helicopter's and use theirs of information support of channels the prevention of critical regimes system's are considered.*

**Keywords:** *helicopter, critical regimes, prevention systems, channels, information support, security criteria.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Volodko, A.M. Bezopasnost' poletov vertoletov / A.M. Volodko. – M.: Transport, 1981. – 342 s.
2. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva postroenija bortovyh informacionno-upravljajushhih sistem obespechenija bezopasnosti poleta / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2004. – 350 s.
3. Bravermann, A.S. Dinamika vertoleta: Predel'nye rezhimy poleta / A.S. Bravermann, A.P. Vajntrub– M.: Mashinostroenie, 1988. – 280 s.
4. Petrosjan, Je.A. Ajerodinamika soosnogo vertoleta: balansirovka, ustojchivost', upravlenie, manev-rirovanie, avtomaticheskaja stabilizacija i upravlenie / Je.A. Petrosjan. – M.: Poligon-Press, 2004. – 816 s.
5. Derevjankin, V.P. Osobennosti sistemy preduprezhdenija kriticheskikh rezhimov poleta vertoleta / V.P. Derevjankin, O.O. Kuznecov, V.M. Soldatkin // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2012. – № 3. – S. 51-55.
6. Normy letnoj godnosti grazhdanskih vertoletov. – M.: CAGI, 1987. – 350 s.
7. Kuznecov, O.I. Sintez informativnyh funkcij opasnosti kriticheskikh rezhimov poleta vertoleta / O.I. Kuznecov, V.M. Soldatkin // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2013. – № 3. – S. 50-56.

### **Kuznetsov Oleg Igorevich**

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU-KAI), Kazan  
Poststudent of department “Devices and information-measurement systems” (DIMS)  
Privolzhskaya, 171 A, Kazan, 420079  
Ph.number +79872908148  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

### **Soldatkin Vladimir Mihailovich**

Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU-KAI), Kazan  
Doctor of Technical Science, professor, head of department “Devices and information-measurement systems” (DIMS)  
Privolzhskaya, 171 A, Kazan, 420079  
Ph.number +79872908148  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

П.Н. ШКАТОВ, А.К. МАЛИНОВСКИЙ, К.В. МЯКУШЕВ

## ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИН ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ С УЧЕТОМ НЕСКОЛЬКИХ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕГИСТРИРУЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

*Статья посвящена интерпретации результатов измерений электропотенциальным методом глубины трещины прямоугольной формы при вариации ее длины, толщины контролируемого участка, а также угла наклона трещины и кривизны поверхности дефектного участка. Разработанный алгоритм интерпретации основан на сочетании аналитического решения и дискретных данных, полученных численно методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** электропотенциальный метод, поверхностная трещина, глубина трещины, кривизна поверхности, наклонная трещина, интерпретация.

### Введение

Электропотенциальный метод [1] основан на пропускании тока через контролируемый участок с помощью токовых электродов и регистрацию напряжения между потенциальными электродами. Он успешно применяется для измерения глубины поверхностных трещин, выявленных каким-либо другим методом неразрушающего контроля, а также для получения информации о росте трещин в процессе механических испытаний [2-4].

О глубине трещины судят по относительному изменению напряжения от  $U_0$  до  $U_r$ , при переходе от бездефектного участка к дефектному. Вычисляемая по результатам измерений величина  $U^* = (U_r - U_0)/U_0$  не зависит от удельной электрической проводимости металла с однородными электрическими свойствами. Для исключения влияния его магнитной проницаемости измерения проводят, используя при пропускании постоянный ток [5].

Вместе с тем, на величину  $U^*$ , помимо измеряемого параметра – глубины трещины  $h$ , влияют и другие параметры, в частности, длина  $\ell$  трещины и толщина  $T$  контролируемого участка [6-7].

### Зависимости, учитывающие влияние отдельных факторов

В работе [8] аналитически решена задача вычисления величины нормированного напряжения  $U^*$ , создаваемого поверхностной трещиной прямоугольной формы в пластине толщиной  $T$  при пропускании постоянного тока, вводимого на контролируемом участке с помощью точечных электродов, установленных на одной линии. Предполагалось, что трещина ортогональна поверхности пластины. Интерпретация результатов измерения на основе полученного аналитического решения реализована в электропотенциальном измерителе глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» [9]. В данном приборе предусмотрена возможность работы с электропотенциальными преобразователями, имеющими произвольные межэлектродные расстояния при размещении электродов вдоль одной линии и симметрично относительно центра.

В работе [10] путем численных расчетов методом конечных элементов (МКЭ) исследовались особенности измерения глубины трещины на цилиндрических поверхностях. Приведенные на рисунке 1 оценки погрешности измерения показывают необходимость учитывать влияние кривизны поверхности при соответствующем сочетании параметров. Кривизна поверхности, как показано в [11], может оцениваться тем же прибором, которым измеряется и глубина трещины. Информацию о кривизне поверхности получают по отношению напряжений  $U_{01}$  и  $U_{02}$  электропотенциального преобразователя (ЭПП) при установке его электродов вдоль оси цилиндрической поверхности и перпендикулярно ей. Соответствующая зависимость приведена на рисунке 2, где  $R_T$  – расстояние между токовыми электродами,  $R_P$  – между потенциальными, а  $D$  – диаметр цилиндрической поверхности.

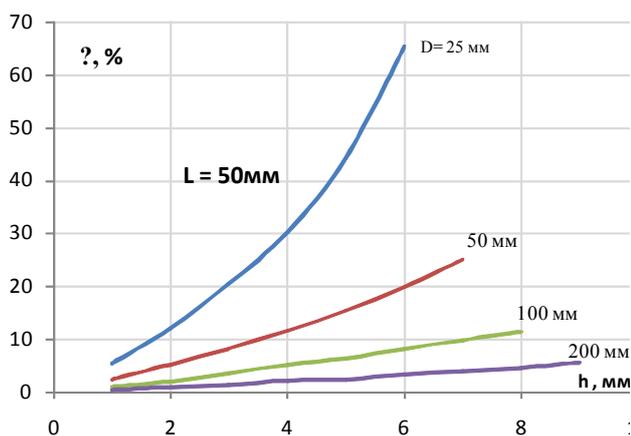


Рисунок 1 – Зависимость отношения  $U_{01}$  и  $U_{02}$  от  $D/R_T$  при  $R_T=20$  мм и  $R_P=2$  мм для продольных трещин

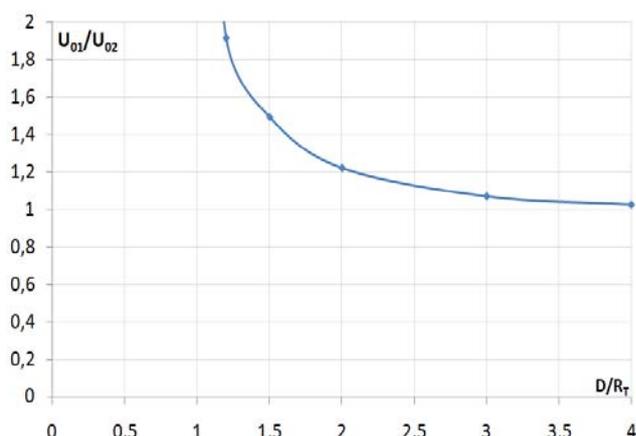


Рисунок 2 – Зависимость отношения  $U_{01}$  и  $U_{02}$  от отношения  $D/R_T$

Следует отметить, что при отношении  $U_{01}/U_{02}$  близком к 1 влияние кривизны весьма мало, что имеет место при  $D/R_T > 3$ .

В работе [12] дополнительно исследовалось влияние угла  $\alpha$  между плоскостью трещины и нормалью к поверхности контролируемого участка. Соответствующая геометрическая расчетная модель приведена на рисунке 3, где показано сечение образца с трещиной по плоскости, проходящей через ее центр. Задача решалась численно, на основе МКЭ.

На основе выполненных исследований был разработан способ получения информации о влиянии угла  $\alpha$  на величину  $U^*$ . Суть данного способа состоит в регистрации наряду с напряжением  $U_r$  при симметричном положении электродов электропотенциального преобразователя (ЭПП) еще и двух напряжений  $U_{r1}$  и  $U_{r2}$  при асимметричном.

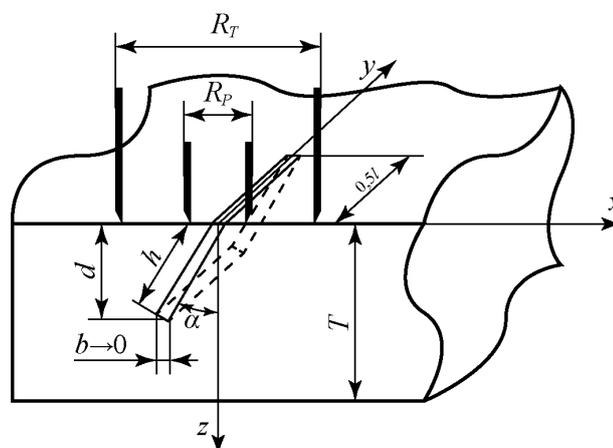


Рисунок 3 – Геометрическая расчетная модель взаимодействия электропотенциального преобразователя с трещиной

$R_T$  – расстояние между токовыми электродами,  
 $R_P$  – между потенциальными,  $\ell$  – длина трещины

Соответствующая схема измерения показана на рисунке 4.

Зависимости между параметрами трещины  $h$ ,  $\alpha$  и напряжениями  $U_r$ ,  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$  для наглядности целесообразно представить в виде диаграммы [11], где по одной из осей отложена величина  $U^* = (U_r - U_0) / U_0$ , а по другой оси –  $\Delta U^*_{сдв} = (U_{r1} - U_{r2}) / U_0$ .

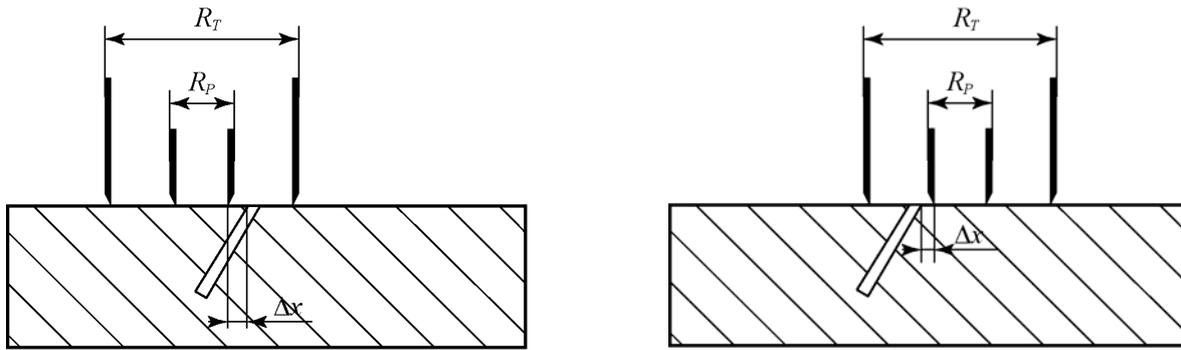


Рисунок 4 – Схема измерения  $U_{r1}$  (слева) и  $U_{r2}$  (справа)

На рисунке 5 приведена диаграмма  $\Delta U^*_{сдв} = \Delta U^*_{сдв}(U^*)$  при фиксированных параметрах  $R_P = 2$  мм,  $R_T = 20$  мм,  $\Delta x = 2$  мм,  $T = 20$  мм и  $\ell = 50$  мм.

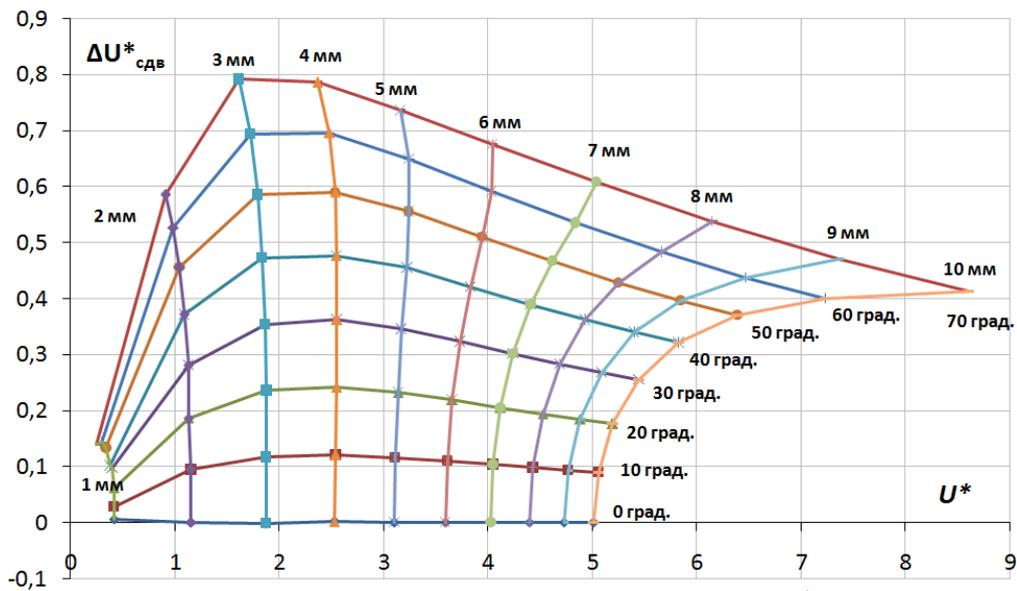


Рисунок 5 – Диаграмма в координатах  $\Delta U^*_{сдв} - U^*$

### Измерение глубины трещины с учетом нескольких влияющих факторов

По значениям  $U^*$  и  $\Delta U^*_{сдв}$ , вычисляемым через регистрируемые напряжения  $U_r$ ,  $U_{r1}$ ,  $U_{r2}$ , и  $U_0$ , с помощью данной диаграммы можно определить величину  $U^*_Н$ , соответствующую воздействию трещины при ее ортогональном к поверхности контролируемого участка положению. Проведенные исследования показали, что отношение  $U^*/U^*_Н$  слабо зависит от  $\ell$  и  $T$ . Это позволяет с приемлемой для практики погрешностью определить величину  $U^*_Н$ , опираясь на данные, полученные при нескольких фиксированных значениях  $\ell$  и  $T$ .

Таким образом, задача о вычислении параметров наклонной трещины сводится к задаче вычисления глубины для ортогональной трещины конечной длины в пластине на основе аналитического решения [8].

Аналогичным образом, напряжение  $U^*$ , полученное на криволинейном участке, приводится к напряжению  $U^*_{П}$  для плоского участка, на основании зависимостей численно полученных МКЭ. Здесь также наблюдается слабая зависимость отношения  $U^*/U^*_{П}$  от  $\ell$  и  $T$ , как для продольных, так и для поперечных трещин. Следовательно, и здесь для определения  $U^*_{П}$  достаточно зависимостей, полученных при нескольких значениях  $\ell$  и  $T$ .

Таким образом, для измерения глубины трещины, не ортогональной к поверхности или расположенной на участке с криволинейной поверхностью, достаточно скорректировать измеренное напряжение  $U^*$ , приведя его к напряжению  $U^*_Н$  или  $U^*_{П}$ . Возможен и одновременный учет обоих факторов, однако для этого необходимо получить и проанализировать зависимости для наклонных трещин на цилиндрических поверхностях.

Для практической реализации измерения глубины поверхностных трещин конечной длины  $\ell$  на участках с толщиной  $T$  с одновременным учетом влияния угла наклона трещин  $\alpha$  или кривизны поверхности был принят следующий подход. По результатам численных расчетов были сформированы массивы, рассчитанные при конкретных межэлектродных расстояниях  $R_T = 20$  мм и  $R_P = 2$  мм. Эти параметры соответствуют электропотенциальному преобразователю ЭПП 2×20, используемому в приборе «ЗОНД ИГТ-98».

Массивы были рассчитаны при трех значениях  $\ell = 10$  мм, 20 мм и 50 мм и  $T = 2$  мм, 5 мм и 20 мм для глубин трещин, изменяемых от 1 мм до 10 мм с шагом 1 мм.

Значения  $U^*$  и  $\Delta U^*_{сдв}$  для измерения глубины наклонных трещин вычислялись при изменении  $\alpha$  от 0 до 70° с шагом 10°.

Значения  $U^*$  для измерения глубины трещин на цилиндрических поверхностях вычислялись для отношений  $D/R_T$  от 1,2 до 3,2 с шагом 0,5. Массивы формировались отдельно для продольных и поперечных трещин.

При обработке результатов измерения по предварительно вычисленным данным строились аппроксимирующие зависимости в требуемом диапазоне значений  $h$ ,  $\ell$ ,  $T$  и  $\alpha$  или  $h$ ,  $\ell$ ,  $T$  и  $D$ . Для этого применялась аппроксимация табличных зависимостей в операциях подбора линий тренда в программе табличных расчетов Excel.

Так как величина  $h$  при интерпретации неизвестна процесс вычисления итерационный. В качестве начального приближения  $h$  принималась величина, полученная без учета влияния  $\alpha$  для наклонной трещины или кривизны поверхности.

Разработанный алгоритм интерпретации был реализован на основе электропотенциального измерителя глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98», позволяющего передавать измеренные им напряжения в ПК для их последующей обработки и имеющего с ПК двустороннюю связь.

Результаты измерения на образцах с искусственными дефектами, выполненными электроэрозионным способом, убедительно показали правомерность принятого подхода. Погрешность измерения глубины искусственных дефектов не превысила 12 % при изменении всех параметров в произвольных сочетаниях во всем диапазоне измерений.

### Выводы

1. При измерении глубины поверхностных трещин электропотенциальным методом на регистрируемые сигналы существенное влияние оказывают такие параметры, как их длина, толщина и кривизна контролируемого участка, угол наклона плоскости трещины относительно нормали к поверхности.

2. Для одновременного учета совокупности всех влияющих факторов целесообразен подход, сочетающий аналитическое решение для задачи о трещине конечной длины на участке конечной толщины с табличными данными и интерполяционными зависимостями, полученными численными методами и учитывающими влияние других значимых факторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 томах. Т.5. / под ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 2: Электрический контроль / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Кондорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. – М.: Машиностроение, 2004. – 697 с.
2. Makoto Akama, Masumi Saka. Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique // Engineering Fracture Mechanics Vol. 72. – Issue 2. – January 2005. – P. 319-334.
3. Hicks M. A., Pickard A. C. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination // International Journal of Fracture. – 1982. – 20. – 91-101.
4. Cláudio R.A., Maia J., Dias Pereira J.M., Baptista R., Branco C.M. and Byrne J. Development of a DC potential drop system controlled by computer // 9th Portuguese Conference on Fracture. – ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials), 2004.
5. Брайнин, Э.И. Контроль элементов электрических машин и аппаратов электропотенциальным методом / Э.И. Брайнин. – М.: Энергия, 1980. – 80 с.

6. Шкатов, П.Н. Исследование погрешности измерения глубины трещин электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 14-ой российской НТК «Неразрушающий контроль и диагностика». – М. – 1996.
7. Shkatov P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method // 7<sup>th</sup> European Conference on NDT. – Copenhagen. – 1998.
8. Шкатов, П.Н. Решение обратной задачи электропотенциальной дефектометрии для поверхностной трещины конечной длины / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 3-ей международной НТК "Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике". – М. – 2002.
9. Шкатов, П.Н. Компьютеризированный измеритель глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» / П.Н. Шкатов // Контроль. Диагностика. Машиностроение. – № 2. – 1998.
10. Шкатов, П.Н. Измерение глубины трещин на цилиндрических поверхностях и в области галтельных переходов электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов, А.А. Елисов // Приборы. – 2013. – №4. – С. 12-15.
11. Шкатов, П.Н. Способ измерения глубины трещины электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов, А.А. Елисов // Положительное решение от 14.06.2014 о выдаче патента на изобретение по заявке № 2013111993 от 19.03.2013.
12. Шкатов, П.Н. Теоретическое исследование выходных характеристик электропотенциального преобразователя при его взаимодействии с наклонными трещинами конечной длины / П.Н. Шкатов, П.И. Черненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 6 (293). – С. 48-52.

**Шкатов Петр Николаевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва  
Доктор технических наук, профессор  
Тел. (495) 964-91-50  
E-mail: petr\_shkatov@mal.ru

**Малиновский Алексей Константинович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», г. Москва  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел. (495) 964-91-50  
E-mail: amalin@inbox.ru

**Мякушев Константин Викторович**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», г. Москва  
Кандидат технических наук, докторант  
Тел. (495) 964-91-50  
E-mail: myakushev.k@yandex.ru

---

P.N. SHKATOV, A.K. MALINOVSKIY, K.V. MYAKUSHEV

**DEPTH MEASUREMENT CRACKS ELECTRIC POTENTIAL  
METHOD TAKING INTO ACCOUNT SEVERAL PARAMETERS  
THAT AFFECT THE RECORDED VOLTAGE**

*The article is devoted to the interpretation of the results of measurements of the electric potential method of the crack depth of rectangular form with variations of its length, thickness of controlled area, as well as the angle of cracks and curvature of the surface of the defective area. The developed algorithm interpretation based on a combination of analytical solutions and of the discrete data obtained numerically by the finite element method.*

**Keywords:** *electric potential method, surface crack depth cracks, surface curvature, hatch-back crack, interpretation.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik v 8 tomah. T.5. / pod red. V.V. Kljueva. T. 5: V 2 kn. Kn. 2: Jelektricheskij kontrol' / K.V. Podmaster'ev, F.R. Sosnin, S.F. Kondorf, T.I. Nogacheva, E.V. Paholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhickij. – М.: Mashinostroenie, 2004. – 697 s.
2. Makoto Akama, Masumi Saka. Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique // Engineering Fracture Mechanics Vol. 72. – Issue 2. – January 2005. – P. 319-334.

3. Hicks M. A., Pickard A. C. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination // International Journal of Fracture. – 1982. – 20. – 91-101.
4. Cláudio R.A., Maia J., Dias Pereira J.M., Baptista R., Branco C.M. and Byrne J. Development of a DC potential drop system controlled by computer // 9th Portuguese Conference on Fracture. – ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials), 2004.
5. Brajnin, Je.I. Kontrol' jelementov jelektricheskikh mashin i apparatov jelektropotencial'nym metodom / Je.I. Brajnin. – M.: Jenergija, 1980. – 80 s.
6. Shkatov, P.N. Issledovanie pogreshnosti izmerenija glubiny treshhin jelektropotencial'nym metodom / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 14-oj rossijskoj NTK «Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika». – M. – 1996.
7. Shkatov P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method // 7th European Conference on NDT. – Copenhagen. – 1998.
8. Shkatov, P.N. Reshenie obratnoj zadachi jelektropotencial'noj defektometrii dlja poverhnostnoj treshhiny konechnoj dliny / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 3-ej mezhdunarodnoj NTK "Komp'juternye metody i obratnye zadachi v nerazrushajushhem kontrole i diagnostike". – M. – 2002.
9. Shkatov, P.N. Komp'juterizirovannyj izmeritel' glubiny treshhin «ZOND IGT-98» / P.N. Shkatov // Kontrol'. Diagnostika. Mashinostroenie. – № 2. – 1998.
10. Shkatov, P.N. Izmerenie glubiny treshhin na cilindricheskikh poverhnostjakh i v oblasti galtel'nyh perehodov jelektropotencial'nym metodom / P.N. Shkatov, A.A. Elisov // Pribory. – 2013. – №4. – S. 12-15.
11. Shkatov, P.N. Sposob izmerenija glubiny treshhiny jelektropotencial'nym metodom / P.N. Shkatov, A.A. Elisov // Polozhitel'noe reshenie ot 14.06.2014 o vydache patenta na izobrenie po zajavke № 2013111993 ot 19.03.2013.
12. Shkatov, P.N. Teoreticheskoe issledovanie vyhodnyh karakteristik jelektropotencial'nogo preobrazovatelja pri ego vzaimodejstvii s naklonnymi treshhinami konechnoj dliny / P.N. Shkatov, P.I. Cher-nenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 6 (293). – S. 48-52.

### **Skatov Petr Nikolaevich**

MoscowState University of Instrument and Computer Science, Moscow  
Doctor of technical Sciences, professor  
Tel.: (495) 964-91-50  
E-mail: petr\_shkatov@mail.ru

### **Malinovsky Alexey Konstantinovich**

MoscowState University of Instrument and Computer Science, Moscow  
Candidate of technical Sciences, Professor associat  
Tel.: (495) 964-91-50  
E-mail: amalin@inbox.ru

### **Myakushev Konstantin Viktorovich**

MoscowState University of Instrument and Computer Science, Moscow  
Candidate of technical Sciences, doctoral student  
Tel.: (495) 964-91-50 E-mail: myakushev.k@yandex.ru

# **ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.1.082.7

А.Д. КАТУНИН, Л.И. ЛЕБЕДЕВА

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ СИЛЫ КОММУТАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ**

*Контактные пары разъёмных электрических соединителей, по сравнению с соединителями других типов, имеют особенности процесса трения. Это обстоятельство необходимо учесть при проведении контроля силы коммутации деталей прямоугольных электрических соединителей.*

*Ключевые слова:* трение; трибология; фрикционный контакт; зона трения; разъёмный электрический соединитель; контактная пара; износ; фактическая площадь контакта; сила сочленения; сила расчленения

В соответствии с современной технической терминологией, «электрический соединитель» – это электромеханическое устройство, обеспечивающее электрическое и механическое соединение двух блоков электроаппаратуры. Как правило, один из блоков является базовым, второй блок – заменяемым [1].

В настоящее время известны два способа классификации электрических соединителей: по конструктивным признакам и по эксплуатационным параметрам.

По конструктивным признакам все виды электрических соединителей могут быть разделены на два класса – неподвижные и подвижные. Неподвижные соединители можно разделить на неразборные, разборные и разъёмные. В подвижных соединителях детали контактной пары могут перемещаться относительно друг друга. Перемещение может быть постоянным, как в скользящих контактах, или импульсным, как в разрывных контактных парах релейных устройств.

Разъёмные электрические соединители предназначены для многократного замыкания и размыкания в процессе работы электроустановки. Материалами для деталей контактных пар разъёмных соединителей могут служить: серебро и его сплавы, золото и его сплавы, а также многослойные покрытия.

Классификация по эксплуатационным параметрам позволяет разделить соединители на три группы [2]: соединители для электроэнергетики; соединители для промышленной и бытовой электротехники; соединители для радиоэлектроники. Качество разъёмов определяется совокупностью электрических, механических параметров и показателей надёжности.

Электрические параметры соединителя определяют степень его соответствия своему функциональному назначению – обеспечение заданного сопротивления и ёмкости на участке электрической цепи, обеспечение необходимого сопротивления изоляции, исключение риска возникновения коротких замыканий в разъёме.

Показатели надёжности определяют способность соединителя выполнять свои функции в течение срока службы. При нормировании электрических параметров ГОСТ 23784–98 требует неизменности переходного сопротивления контакта и сопротивления изолятора в пределах времени, равному сроку сохраняемости соединителя, причём как при его работе, так и после хранения.

Механические характеристики разъёмных электрических соединителей не относятся ни к показателям их назначения, ни к показателям надёжности. Но при этом они являются важнейшими показателями качества соединителя, так как от их значений зависят и электрические параметры и надёжность. К механическим характеристикам разъёмов относятся:

- 1) сила коммутации (сочленения и расчленения) штыря и гнезда контактной пары;
- 2) унификация габаритных и присоединительных размеров соединителя с размерами изделий РЭА;

3) максимально возможное количество одновременно коммутируемых электрических цепей.

Среди перечисленных механических характеристик особое значение для соединителя имеет сила сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары. Она определяет сразу три важнейших показателя:

1) переходное сопротивление контакта в контактной паре;

2) электрическую ёмкость контактной пары;

3) надёжность соединения, под которой в данном случае понимается устойчивость системы «штырь–гнездо» к случайному разъединению при вибрации, ударах, резких изменениях температуры окружающей среды и других воздействиях.

Контроль силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары производится по методике, сущность которой передана рисунком 1.

Контрольный штырь–калибр соединяется с грузом и сочленяется с гнездом. Если сила тяжести от груза меньше силы трения в контактной паре, то штырь–калибр удерживается в гнезде контактной пары. Если же сила тяжести превышает силу трения, то контрольный штырь–калибр выпадает. Значение силы трения в контактной паре разъёма определяет стабильность электрических параметров контакта, так как сила трения служит для предотвращения непроизвольного перемещения рабочих поверхностей деталей контактной пары относительно друг друга, приводящего к изменению значения переходного сопротивления контакта,

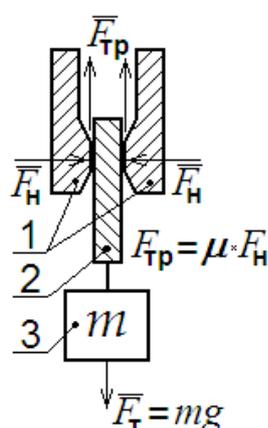


Рисунок 1 – Схема измерения силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары

- 1 – гнездо контактной пары;  
2 – контрольный штырь–калибр;  
3 – груз массой  $m$

разрыву электрического сопротивления в разъёме и повышению интенсивности электрического изнашивания поверхностей из-за возникновения электрических искр и дуг. При этом значение силы трения в контактной паре разъёма даже не нормируется нормативными документами – для них задаётся только сила сочленения или расчленения, хотя стандартная схема измерения этой силы составлена так, что при её реализации оценивается именно сила трения.

Сила сочленения и расчленения определяется и нормируется, исходя из значения массы удерживаемого и выпадающего грузов. Например, для одной контактной пары разъёма типа СНП–260 допустимое значение силы сочленения 20 граммов (0,2 Н), а допустимое значение силы расчленения – 60 граммов (0,6 Н).

Основными достоинствами данной методики являются: простота реализации, наглядность и понятность результатов контроля, стабильность значения силы сочленения и расчленения (так как она задаётся массой груза).

Основной проблемой контроля механических характеристик соединителей являются недостатки дан-

ной методики: сложность автоматизации процесса контроля, разрушение покрытия поверхностей при проведении контроля, неадекватность методики реальным условиям эксплуатации соединителя.

Проблема автоматизации процесса контроля силы сочленения–расчленения является наиболее актуальной. Действующая методика предусматривает ручной контроль каждой контактной пары. Современный разъём имеет 10...200 контактных пар, поэтому трудоёмкость такого контроля очень велика. Для решения данной задачи может быть использована поточная электромеханическая линия контроля, а также такие методы неразрушающего контроля, как электрорезистивный, электростатический и электромагнитный.

Вторая проблема – разрушение покрытия поверхностей при проведении контроля. Контрольный штырь–калибр изготавливается из высокоуглеродистой стали и имеет полированную поверхность высокой прочности. На поверхностях деталей контактной пары разъёма нанесено мягкое серебряное покрытие, нанесённое гальваническим способом.

Так как твёрдость поверхности гнезда (серебро) меньше твёрдости поверхности контрольного штыря–калибра (закалённая и полированная сталь), даже однократное измерение силы сочленения–расчленения приводит к повреждению серебряного покрытия поверхности детали соединителя. На рисунке 2 показаны фотографии поверхности штыря контактной пары до (рис. 2, а) и после (рис. 2, б) одного замыкания. На фотографии рисунка 2, б отчётливо виден след износа поверхности штыря контактной пары после одного замыкания.

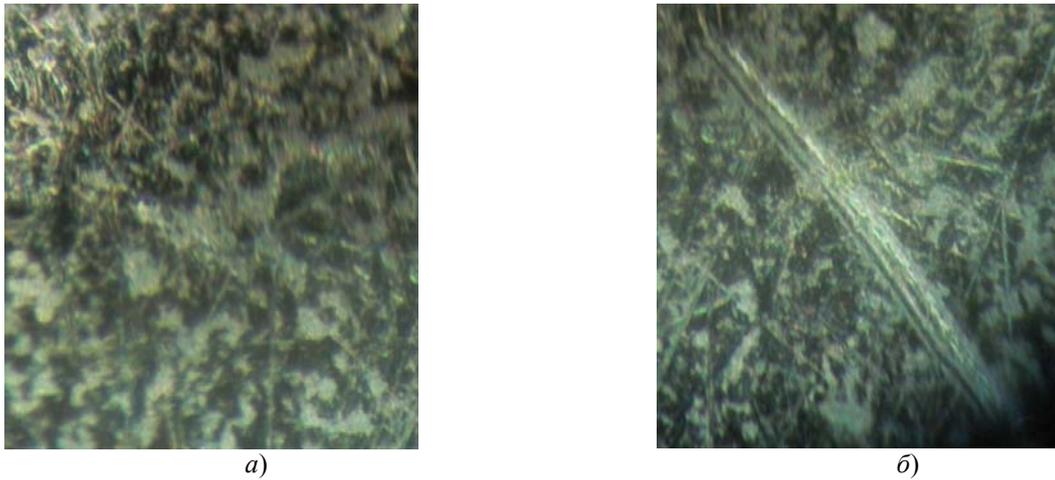


Рисунок 2 – Увеличенное изображение посеребрённой поверхности штыря контактной пары разъёма до (а) и после (б) одного замыкания

Это явление подтверждают результаты многократных измерений параметров шероховатости поверхностей деталей различной твёрдости. Целью измерений стала опытная проверка закономерности изменения шероховатости поверхностей при контактировании деталей одинаковой и разной твёрдости.

На рисунках 3 и 4 показаны результаты многократных измерений параметров шероховатости поверхностей, изготовленных из стальных деталей, медных деталей, и деталей с серебряным покрытием поверхностей. При этом на рисунке 3 показаны результаты измерения параметра шероховатости  $R_{max}$  (наибольшая высота неровностей профиля в пределах базовой длины), а на рисунке 4 – результаты измерения параметра шероховатости  $S_m$  (средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины).

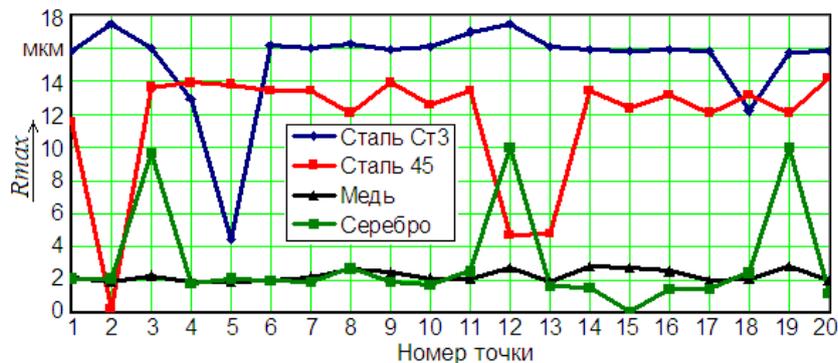


Рисунок 3 – Результаты многократных измерений параметра шероховатости  $R_{max}$

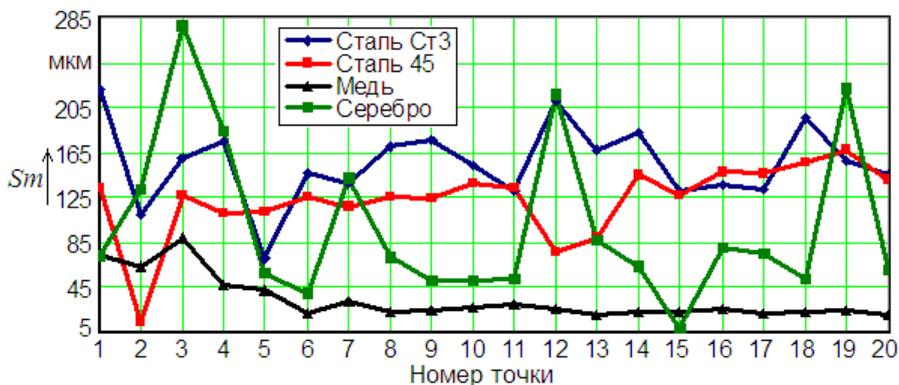


Рисунок 4 – Результаты многократных измерений параметра шероховатости  $S_m$

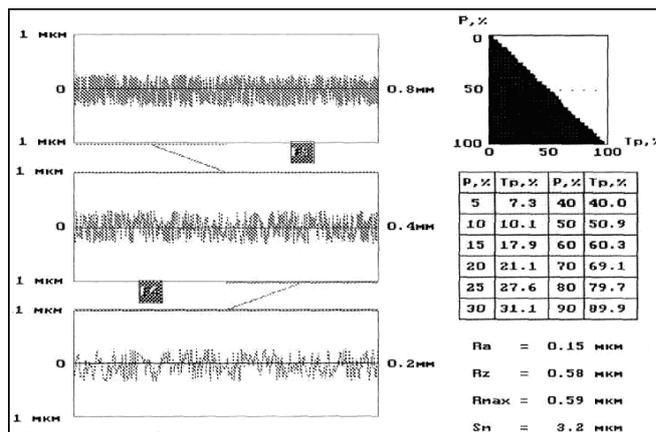
Для измерения параметров шероховатости использован профилограф–профилометр «АБРИС–ПМ7.2», который установлен в Центре коллективного пользования измерительным и испытательным оборудованием Госуниверситета – УНПК. Профилометр предназначен для

измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных и приборостроительных предприятий, а также в полевых условиях, и для измерения шероховатости шаров. Измерение параметров шероховатости поверхности производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789–73 [3, 4]. Датчик профилометра показан на рисунке 5.

Действие профилометра основано на ощупывании неровностей измеряемой поверхности алмазной иглой и преобразовании колебаний щупа датчика в пропорциональные им колебания электрического напряжения. Колебания напряжения обрабатываются в отсчетном устройстве или персональном компьютере по специальной программе, и результат обработки выводится в цифровом виде на индикатор отсчетного устройства или в цифровом и графическом виде на экран монитора компьютера (рис. 6).



**Рисунок 5 – Датчик профилографа–профилометра «АБРИС–ПМ7.2»**



**Рисунок 6 – Вид экрана монитора компьютера с результатом измерения шероховатости**

Анализ профилограмм показывает, что при контакте деталей одинаковой твёрдости их шероховатость практически не изменяется (сталь 3 и сталь 45), а при контакте твёрдой поверхности с мягкой происходит срез неровностей (серебро). Наиболее отчётливо особые свойства контактирования посеребренных деталей видны на рисунке 3: «всплески» значений параметра шероховатости  $R_{max}$  соответствуют срезанию участка серебряного покрытия (рисунк 3, б) и его попаданию под измерительный наконечник профилометра–профилографа. При этом интересно, однако, что в контакте «медь–сталь» среза неровностей не происходит.

Результаты измерения параметров шероховатости подтверждают, что характер изменения профиля поверхности детали с серебряным покрытием в процессе её контактирования с другой поверхностью существенно отличается не только от характера изменения профиля поверхностей деталей из сталей различного качества (качественная горячекатаная сталь 45 и низкоуглеродистая сталь обыкновенного качества Ст 3), для которых контакт, как правило, считается упругим, но и от характера изменения профиля поверхности медной детали, для которой контакт обычно признаётся пластическим [5].

Контрольный штырь–калибр изготавливается из высокоуглеродистой стали и подвергается полированию. После этого он замыкается с гнездом контактной пары для контроля силы сочленения–расчленения. Значит, трение происходит в паре «закалённая сталь – серебро». В реальных условиях эксплуатации соединителя трение происходит в паре «серебро–серебро». Поэтому проблема адекватности результатов контроля силы сочленения и расчленения реальным условиям эксплуатации соединителей также остаётся актуальной.

Таким образом, действующая методика контроля механических характеристик электрических соединителей нуждается в модернизации, которую необходимо проводить в двух направлениях: использование неразрушающих методов контроля, адекватных реальным условиям эксплуатации соединителей, и разработка системы автоматического контроля силы сочленения–расчленения контактной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение и износ фрикционных материалов / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1977. – 136 с.
2. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
3. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология / Н.Б. Демкин // Трение и износ, 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003–1024.
4. Степанов, Ю.С. Приборы неразрушающего контроля нового поколения над процессом формирования топографии микрорельефа / Ю.С. Степанов, Е.А. Белкин, В.Н. Поярков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2013. – № 4 (300). – С. 145–149.
5. Уткин, Г.И. Особенности процесса трения рабочих поверхностей деталей контактной пары разъёмного электрического соединителя / Г.И. Уткин, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2012. – № 2–5 (292). – С. 95–100.

**Катунин Андрей Дмитриевич**

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК», г. Карачев  
Студент индустриального факультета  
Телефон (48335)2–00–72;  
E–mail: pms35vm@yandex.ru

**Лебедева Лариса Ильинична**

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», ОАО «Карачевский завод «Электродеталь», г. Карачев  
Ст. преподаватель кафедры «Технология машиностроения», заместитель главного конструктора  
Телефон (48335)2–00–72;  
E–mail: pms35vm@yandex.ru

A.D. KATUNIN, L.I. LEBEDEVA

**ACTUAL PROBLEM OF MONITORING A STRONG OF COMMUTATION  
THE ELEMENTS OF RECTANGULAR ELECTRICAL CONNECTORS**

*The contact pair of prefabricated electrical connectors, on the comparison the connectors of other types, is has the peculiarities the process of friction. This circumstance is necessary account by realization monitoring a strong of commutation the elements of rectangular electrical connectors.*

**Keywords:** friction; tribology; friction contact; zone of friction; prefabricated electrical connector; contact pair; wear; fact area of contact; strength of circuit; strength of disjoin

**BIBLIOGRAPHY**

1. Treniye i iznos friktsionnykh materialov / Pod obshch. red. A.V. Chichinadze. – М.: Nauka, 1977. – 136 s.
2. Myshkin, N.K. Tribologiya. Printsipy i prilozheniya / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – Gornel': IMMS NANB, 2002. – 310 s.
3. Demkin, N.B. Teoriya kontakta real'nykh poverkhnostey i tribologiya / N.B. Demkin // Treniye i iznos, 1995. – Т. 16. – № 6. – S. 1003–1024.
4. Stepanov, Yu.S. Pribory nerazrushayushchego kontrolya novogo pokoleniya nad protsessom formirovaniya topografii mikrorel'yefa / Yu.S. Stepanov, Ye.A. Belkin, V.N. Poyarkov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. - 2013. – № 4 (300). – S. 145–149.
5. Utkin, G.I. Osobennosti protsessa treniya rabochikh poverkhnostey detaley kontaktnoy pary raz'yomnogo elektricheskogo soyedinitelya / G.I. Utkin, V.V. Markov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. - 2012. – № 2–5 (292). – S. 95–100.

**Katunin Andrei Dmitrievich**

Karachevsky branch VPO "State University – ESPC" in Karachi  
Industrial faculty student  
Phone (48335) 2–00–72;  
E–mail: pms35vm@yandex.ru

**Lebedeva Larisa Ilinichna**

Karachevsky branch VPO "State University–ESPC"  
JSC "Plant Karachevsky" Electrodetail "in Karachi  
Lecturer in "Mechanical Engineering", Deputy Chief Designer  
Phone (48335) 2–00–72;  
E–mail: pms35vm@yandex.ru

## РЕЖИМ ПРИРАБОТКИ КАК ФУНКЦИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

*Внешние воздействия обеспечивают условия эффективной приработки в том случае, если работа трибосопряжения проходит в режиме устойчивого смешанного трения. Область эффективной приработки находится в окрестностях критических значений параметра Зоммерфельда, ограничена с одной стороны прямой, характеризующей достижение в начале каждой ступени режима смешанной смазки без перехода к граничному трению, с другой – прямой, ограничивающей область жидкостной смазки с полным разделением поверхностей гидродинамическими силами. Таким образом, реализуется изменение внешних параметров, при котором сопряжению на протяжении всей приработки обеспечиваются эквивалентные условия контактирования поверхностей – при постоянной относительной доле разрушения разделяющего слоя смазки.*

*Проведение приработки на основе триботехнических свойств материалов позволяет достичь максимальной нагрузочной способности для данного сочетания материалов за минимальное время при минимальном износе.*

*Ключевые слова:* режим приработки, режим трения, трибосопряжение, антифрикционные материалы, параметр Зоммерфельда.

Приработку в режиме смешанного трения графически интерпретируют семейством диаграмм Герси–Штрибека, каждая из которых представляет комплексную характеристику смазанных движущихся поверхностей в зависимости от вязкости смазки, скорости и нормальной нагрузки – параметра Зоммерфельда  $S_0$ . Перестроив диаграмму Герси–Штрибека, области режимов трения можно представить, используя в качестве функции отношение толщины масляной пленки  $h$  к суммарной шероховатости поверхностей вала  $R_z^B$  и подшипника  $R_z^П$  – так называемый коэффициент режима трения  $g$ .

$$g = \frac{h}{R_z^B + R_z^П} \quad (1)$$

В этом случае становятся очевидными два перехода: переход от режима жидкостной смазки к смешанной и начало непрерывного контакта микронеровностей. Мгновенное значение  $g$  определяется параметрами внешнего воздействия и свойствами материалов. Очевидно, что для материалов, обладающих лучшей совместимостью [1], переход к граничному трению имеет место при меньших значениях  $g$ .

Приработка трибосистемы в режиме ступенчатого роста внешнего воздействия  $Q$  может быть представлена следующим образом:

Прежде всего, следует отметить, что на ход приработки оказывают влияние два динамических процесса: рост температуры поверхностей, согласно теории Блока и изменения физико–химических и механических свойств материалов поверхностей. Скорость роста температуры оказывает первостепенное влияние на динамическую вязкость и пьезокоэффициент смазки, которые определяют «динамическую» толщину смазочной пленки. Скорость трансформации поверхностного слоя прирабатываемых материалов являются реакцией на ужесточение трения в результате изменяющихся внешних нагрузочных факторов. В процессе увеличения нагрузки от нуля, коэффициент трения в сопряжении снижается и в области смешанного трения – увеличивается. С ростом нагрузки  $S_0$  быстро уменьшается. Начиная с некоторых значений внешних параметров, в определенной степени характеризующих свойства материалов, имеет место нагрев жидкости за счет внутреннего трения. Этот нагрев снижает вязкость и пьезокоэффициент, приводя к уменьшению  $g$ . При этом, если коэффициент режима трения падает ниже некоторого уровня, то возникает контактирование микронеровностей и система переходит в область смешанной смазки. Контактное давление состоит из давления жидкости и давления микронеровностей.

Последнее является генератором процессов адаптации. Таким образом реализуются два конкурирующих процесса: с одной стороны под действием нагрева за счет внутреннего трения и деформаций неровностей, отношение (1) убывает с ростом давлений, и приближение «задира» определяется стабильностью пленок на контактирующих поверхностях от тепловыделения на границах раздела в результате упругопластической деформации. С другой стороны, в процессе взаимной адаптации, изменения топографии поверхностей происходит снижение контактных давлений, температуры и коэффициента трения – развитие процесса определяет переход от режима граничного трения к смешанной смазке и затем к жидкостной, с полным разделением поверхностей, после чего интенсивность приработочных процессов падает вплоть до полного их прекращения. Повторное увеличение нагрузки вызывает рост коэффициента трения  $f$  и убывание коэффициента режима трения  $g$  до значений, соответствующих текущим параметрам внешнего воздействия. На новой ступени приработки коэффициент трения постепенно снижается, а режим трения «зеркально» приближается к гидродинамическому режиму.

Таким образом, превалирующее направление процессов в контакте (адаптация – заедание) определяется физико–химической природой защитных пленок и условиями контактирования, которые зависят как от текущих значений параметров внешнего воздействия так и диапазона их изменения. Завершению приработки соответствует некоторое минимальное значение параметра Зоммерфельда (при максимальных значениях скорости и нормальной нагрузки) при минимальном коэффициенте трения  $f$  и максимальной толщине слоя смазки – максимальном значении  $g$ .

Таким образом, для обеспечения условий «эффективной» приработки нагружение должно назначаться таким образом, чтобы: а) не наблюдалось необратимых процессов, приводящих к повышению коэффициента трения, т.е. внешними воздействиями должны быть созданы такие условия прохождения приработки, когда сопряжения получают минимальные повреждения поверхностей и в контакте интенсивно реализуются процессы адаптации; б) не возникал режим жидкостной смазки, когда поверхности трения полностью разделены и процессы адаптации поверхностей не осуществимы.

Следует отметить, что под нагружением в данном контексте следует понимать любое ужесточение режима трения, которое может быть вызвано как одним фактором, например, ростом скорости скольжения, так и совокупностью факторов (например, увеличением нормальной нагрузки и введением абразива в зону трения).

Диапазон эффективной приработки расположен между областью «опасной» с точки зрения возникновения схватывания (в окрестностях границы заедания) и «неэффективной» (в окрестностях границы перехода к жидкостной смазке) приработки и характеризует взаимосвязь изменений параметров внешнего воздействия и режима трения в контакте. Следует отметить, что в окрестностях границы заедания (граничной смазки) могут иметь место процессы, связанные со специфическими изменениями структуры металлов поверхностей скольжения [1].

Методика испытаний предусматривала проведение приработки антифрикционных материалов при различном характере изменения нагрузки  $\Delta Q$ : нормальной силы  $P$ , скорости скольжения  $V$ , силы трения  $F$ , температуры подаваемого в зазор смазочного масла  $T$ . Приработка каждый раз проводилась по трем режимам, предусматривающим возрастающие ступени  $\Delta Q$  (режим № 1), постоянные ступени роста  $\Delta Q$  (режим № 2) и нормированные ступени роста  $\Delta Q$  (режим № 3). В последнем случае нагружение осуществлялось исходя из реакции трибосистемы на текущее воздействие.

Эксперименты проводились на компьютеризированном триботехническом стенде с обратной связью. В течение всего периода испытаний велась непрерывная запись следующих параметров: нормальной нагрузки  $P$ , скорости скольжения  $V$ , силы трения  $F$ , падения напряжения на стыке  $u$ , температуры зоны контакта  $t_{об}$ , температуры масла  $T$ , коэффициента трения  $f$ , износа  $I$ , параметра Зоммерфельда  $S_0$ , после испытаний контролировалась шероховатость образцов  $Ra$ . В процессе испытаний определялась нагрузка перехода к

гидродинамическому режиму трения  $Q_{гд}$ , на части нагрузок определялась также нагрузка заедания  $Q_z$  по известным методикам [2]

Приработка производилась по схеме колодка–ролик при обильной смазке маслом SAE 10W–30 начальной температурой 50°С. Были исследованы баббит БК2, бронза БрС30, алюминивно–оловянный сплав АО20–1, антифрикционный чугун СЧХН. Контртелом во всех случаях служил высокопрочный чугун ВЧХНМД.

Управление нагружением при детерминированном режиме (№3) осуществлялось в автоматическом режиме исходя из отклика трибосистемы на внешнее воздействие.

Исследованные материалы представляют собой многокомпонентные системы. Исходный структурный состав материалов определяет значение критических параметров внешнего воздействия. Однако известно, что при приработке более существенную роль играет изменение структуры поверхностного слоя. Общеизвестно, желательным механизмом адаптации антифрикционных сплавов с мягкой структурной составляющей является процесс образования легко подвижных пленок мягкой фазы, свойства которых определяются характером внешнего воздействия и, в свою очередь, определяют процессы, происходящие в контакте. Изменение параметров внешнего воздействия вызывает динамические изменения свойств таких пленок и соответствующую степень адаптации. В условиях проведенных испытаний характер изменения роста нагрузки позволяет объяснить существенные различия в поведении одноименных материалов, прирабатываемых по разным режимам. Процесс интенсивного роста доли мягкой фазы на поверхности трения с самого начала приработки по режиму № 3 способствует быстрому росту площади контакта, резкому снижению давлений, локализации термического воздействия в граничном слое. Выполняющая роль твердой смазки в начале приработки, мягкая структурная составляющая препятствует значительному упрочнению твердой матрицы гетерогенных сплавов или пластическому глубинному течению баббита. Поддержание критического уровня значений параметров внешнего воздействия на протяжении всей приработки способствует оптимальному сочетанию свойств поверхностного (разупрочненного) и подповерхностного (упрочненного) слоев, что увеличивает эффект положительного градиента прочности. В результате экспериментальных исследований выявлено, что при приработке сплавов БК2, АО20–1, БрС30 и СЧХН существует такой диапазон изменения внешних параметров (нагрузка, скорость скольжения, температура), в котором на поверхности антифрикционного материала имеет место формирование вторичных структур, обладающих особыми свойствами. Режим № 3 показал, что приработка с убывающими ступенями роста нагрузки позволяет получить более высокую предельную нагрузочную способность за более короткое время.

Таблица 1 – Результаты исследования приработки антифрикционных материалов при различных режимах изменения  $\Delta F$

Материал	Режим изменения $\Delta F$	Нагрузка заедания $P_z$ , МПа	Износ $I$ , мм <sup>3</sup>	Работа трения $A_T$ , кДж	Интенсивность приработки $U$ , МПа/мин
АО20–1	1	30	0,0488	439,0	0,31
	2	36	0,0488	270,0	0,49
	3	40	0,0200	90,0	0,81
БрС30	1	20	0,0440	487,5	0,23
	2	30	0,0506	396,0	0,20
	3	36	0,0254	119,0	0,25
БК2	1	18	0,0358	135,0	0,14
	2	21	0,0388	135,0	0,33
	3	24	0,0292	48,0	0,62
СЧХН	1	14	0,0168	1728,0	0,59
	2	13	0,0174	1584,0	0,62
	3	16	0,0148	252,0	0,80



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Центр “Наука и техника”, 1995. – 501 с.
2. Буше, Н.А. Подшипники из алюминиевых сплавов / Н.А. Буше, А.С. Гуляев, В.А. Двоскина, К.М. Раков. – М: Транспорт, 1974. – 248 с.

**Волченков Алексей Васильевич**

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»

Кандидат технических наук, доцент кафедры АПМ и ТП

Тел. (49234) 77–1–45

E-mail: c067bk@yandex.ru

**Матвеев Евгений Александрович**

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»

Магистр кафедры АПМ и ТП

Тел. (49234) 77–1–45

E-mail: c067bk@yandex.ru

---

A.V. VOLCHENKOV, E.A. MATVEEV

**RUNNING IN MODE AS A FUNCTION  
OF MATERIALS TRIBOLOGICAL PROPERTIES**

*External influences provide effective running– in conditions if the work takes place in the mode tribomating sustainable mixed friction. Effective area is in the vicinity of running critical parameter values Sommerfeld , bounded on one side of the line, which characterizes the achievement at the beginning of each stage of the mixed lubrication regime without transition to the boundary friction, on the other – the line bounding the region of liquid lubrication complete separation surfaces hydrodynamic forces. Thus, the realized change in the external parameters, in which conjugation throughout the running equivalent conditions contacting surfaces – at a constant relative fraction of the destruction of the separating layer of grease.*

*Conduct burnishing based tribological properties of materials designed to achieve maximum load capacity for a given combination of materials in the minimum time with minimum wear.*

**Keywords:** regime running in, regime friction, tribounit, antifriction materials, Sommerfeld parameter.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Osnovy tribologii / Pod red. A.V. Chichinadze. – М.: Tsentr “Nauka i tekhnika”, 1995. – 501 s.
2. Bushe, N.A. Podshipniki iz alyuminiyevykh splavov / N.A. Bushe, A.S. Gulyayev, V.A. Dvoskina, K.M. Rakov. –M: Transport, 1974. – 248 s.

**Volchenkov Aleksey Vasilyevich**

Murom Institute of Vladimir State University, Murom

Ph.D., assistant professor of the department " Automated design of machines"

Phone: (49234) 77145

e-mail: c067bk@yandex.ru

**Matveev Evgeniy Aleksandrovich**

Murom Institute of Vladimir State University, Murom

Master of " Automated design of machines"

Phone: (49234) 77145

e-mail: c067bk@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗЕРВНОЙ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ MEMS-ТЕХНОЛОГИЙ

*Описано повышение точности резервной бесплатформенной системы ориентации за счет введения температурной коррекции и контура выключения коррекции от акселерометров.*

**Ключевые слова:** ориентация, система, акселерометр, коррекция, температура, фильтр.

Разработка бесплатформенной системы ориентации (БСО), которая может использоваться как в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), так и в качестве резервной БСО (РБСО) в пилотируемой авиации, является задачей востребованной. В обоих вариантах применения критичным параметром является время готовности. Для применения в БПЛА требуется минимизация массы и габаритов. При этом необходимо обеспечить требуемую точность определения углов ориентации, а также желательна автономная работа без использования коррекции БСО от спутниковых навигационных систем (СНС).

Применение чувствительных элементов (ЧЭ), прежде всего гироскопов и акселерометров, выполненных с применением MEMS-технологий, позволяет обеспечить выполнение требований к БСО по точности, времени готовности, массе и габаритам [1].

Одной из общегосударственных задач является импортозамещение, в том числе ЧЭ, выполненных по MEMS-технологиям.

В связи с вышесказанным, начиная с 2008 г. ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова» совместно с ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» ведет работу в области создания БСО, построенных на отечественных ЧЭ, выполненных с применением MEMS-технологий, для летательных аппаратов различного класса, включая беспилотные.

Одним из результатов работы явилось создание РБСО (рис. 1) [3], которая конструктивно содержит триаду гироскопов ММГ-ЭПТРОН и триаду акселерометров АТ-1104. Принцип функционирования системы заключается в выявлении корреляции между показаниями гироскопов и акселерометров с целью компенсации накапливаемой погрешности с одной стороны и возникающих в процессе движения линейных перегрузок с другой.

Сравнение сигналов и подавление вредных составляющих сигналов осуществляется с помощью дискретного фильтра Винера [4]. Структурная схема системы показана на рисунке 2.

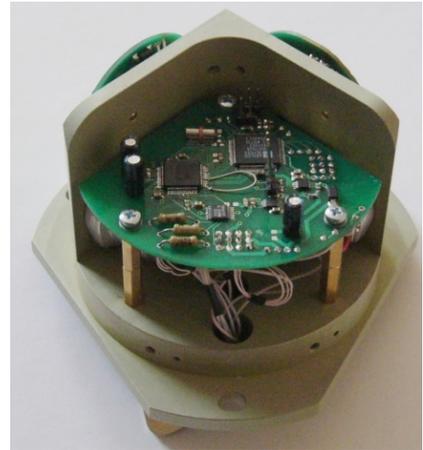


Рисунок 1 – Внешний вид РБСО (без крышки)

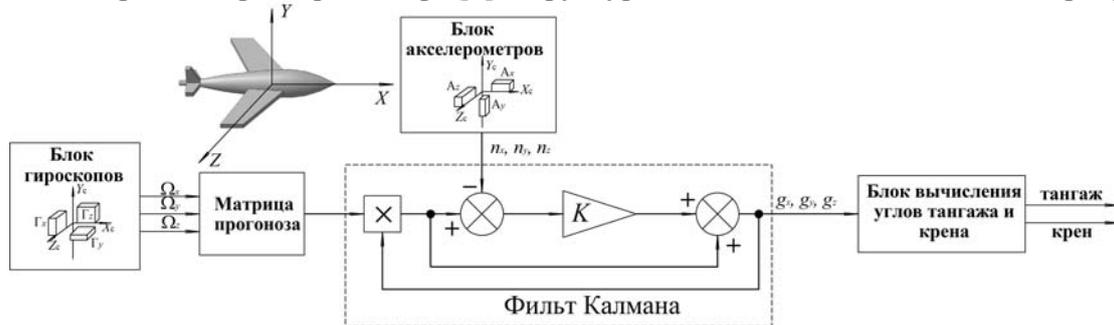


Рисунок 2 – Структурная схема РБСО

РБСО прошла испытания в ФГУП «ГосНИИАС». Испытания включали в себя два этапа:

- проверка функционирования РБСО в статическом режиме;
- проверка функционирования РБСО в динамическом режиме.

В ходе первого этапа РБСО на 3-х степенном стенде СЗ-600, проверялись накапливаемые погрешности: проводилось 6 экспериментов с различными углами ориентации РБСО в течение 10 часов каждый. В ходе второго этапа проверка РБСО проводилась в динамическом режиме работы стенда. При этом имитировались 10-тичасовые полеты по 6 различным маршрутам при использовании аэродинамической модели самолета ТУ-160.

Технические характеристики РБСО с учетом результатов испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики РБСО

Параметр	Значение	Примечание
Диапазон измерения параметров		
Угол тангажа, градус	±90	
Угол крена, градус	±180	
Угловая скорость, градус/с	±100	
Точностные характеристики		
Погрешность угла (амплитуда), градус	1	-прямолинейный полет
	3	-маневрирование
Погрешность угловой скорости (амплитуда), градус/с	2	
Условия эксплуатации		
Линейные перегрузки, м/с <sup>2</sup>	98,1	не более 5 мин
Температура окружающей среды	от -40 °С до 85 °С	стационарная температура (допускается изменение в диапазоне ± 3 °С за период работы)
Влажность, %	90	не более
Время готовности, с	1	не более
Параметры выходного сигнала		
Интерфейс передачи данных	RS-232	
Частота передачи данных, Мбит/с	1	
Частота обновления сигнала, кГц	1	
Уровень логического сигнала, В	2÷5 В	логическая «1»
	0÷0,8 В	логический «0»
Длина слова, байт	2	int
Протокол передачи данных	определяется пользователем	
Массогабаритные характеристики		
Масса, гр	750	
Габариты, мм	74	высота
	94	диаметр корпуса
	118	диаметр основания

В процессе первого этапа накапливаемых погрешностей РБСО не выявлено, наблюдалась стабильность вырабатываемых параметров. В выходном сигнале по каналу угловых скоростей, на начальном участке работы, наблюдалось изменение показаний угловой скорости по аperiodическому закону с постоянной времени порядка 17 мин. Такое изменение вы-

ходного сигнала объясняется температурным дрейфом характеристик применяемых микро-механических датчиков, связанных с прогревом измерительного модуля. В связи с этим для улучшения точностных характеристик системы при сохранении малого времени готовности менее 1 с в алгоритм сбора сигналов первичных измерителей введена температурная компенсация (рис. 3), заключающаяся в корректировке нулевых сигналов и коэффициентов передачи датчиков по сигналам встроенных в них датчиков температуры.

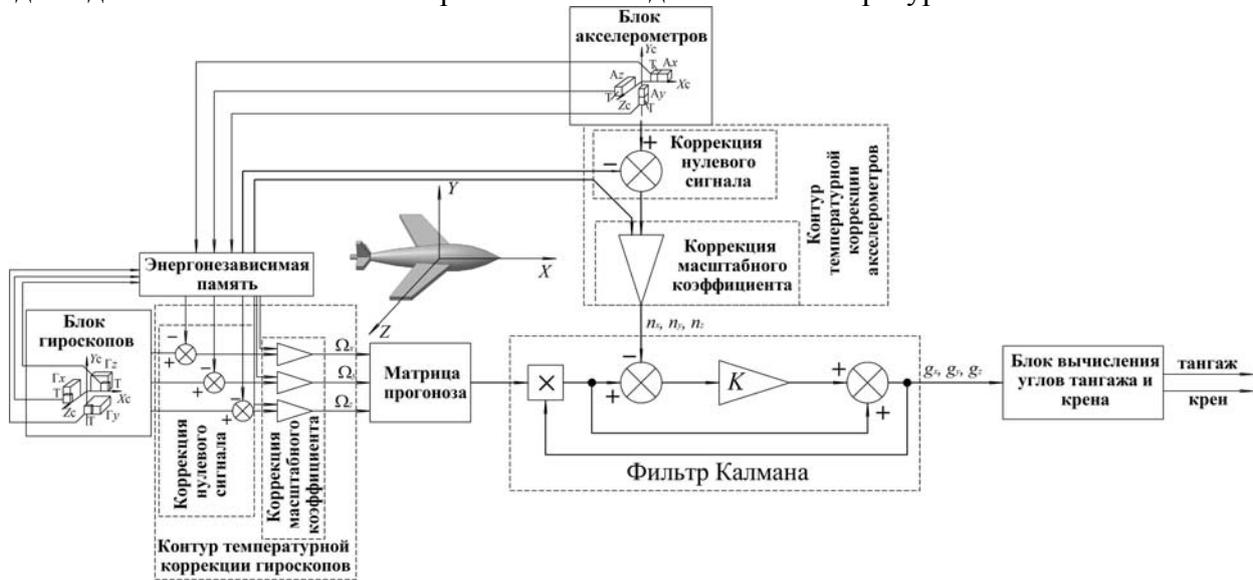


Рисунок 3 – Структурная схема РБСО с алгоритмом температурной компенсации

При повышении точностных характеристик каналов угловых скоростей также повысятся точностные характеристики каналов тангажа и крена, так как при этом снизятся погрешности прогноза фильтра Винера и коэффициент фильтра может быть снижен [4].

На втором этапе испытаний было установлено увеличение погрешности по углам тангажа и крена при маневрировании. Этот эффект объясняется наличием контура коррекции от акселерометров (рис. 2, 3), который подобен маятниковой коррекции, применяемой в платформенных гировертикалях.

Для уменьшения этого эффекта в систему введен контур отключения коррекции от акселерометров (рис. 4). Сигналом к отключению коррекции является угол рассогласования между оценкой вектора силы тяжести земли и показаниями акселерометров.

Результаты моделирования (рис. 5, б, рис. 6) отключения контура коррекции при импульсном воздействии линейного ускорения (рис. 5, а) показали эффективность работы контура коррекции

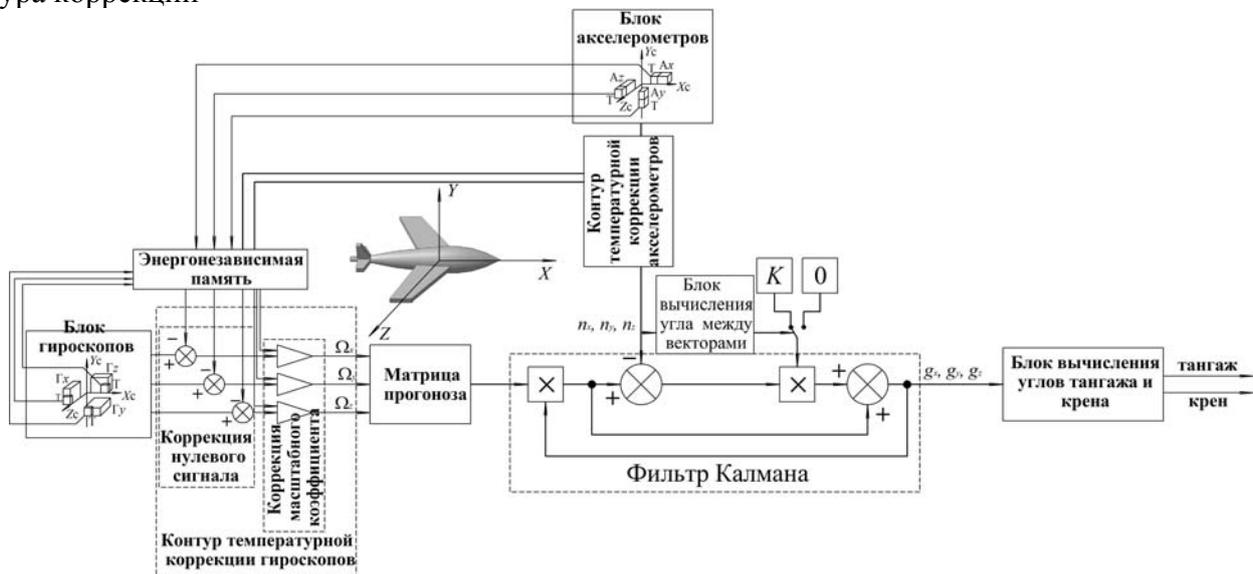
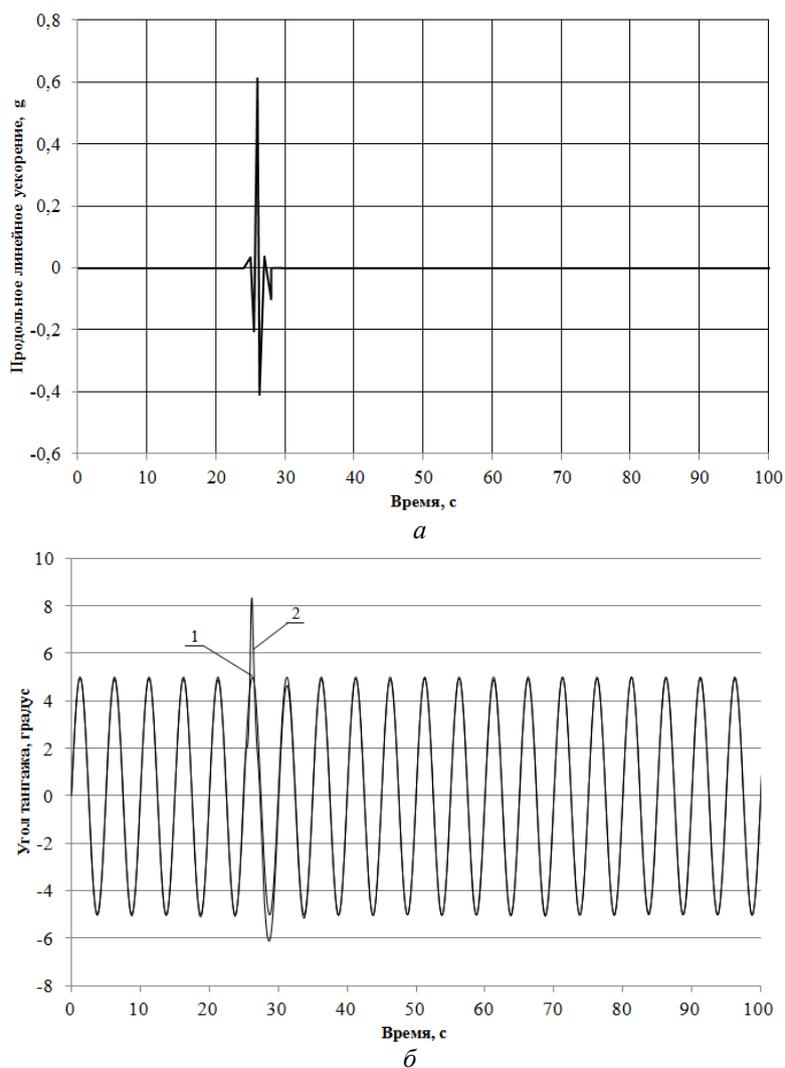
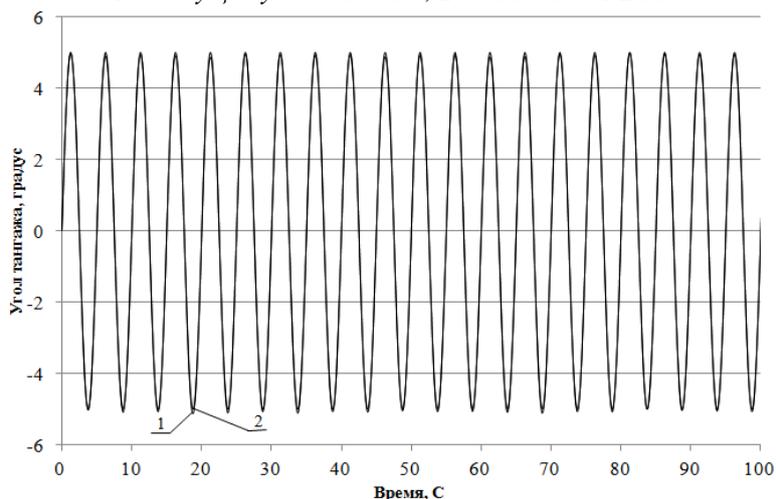


Рисунок 4 – Структурная схема РБСО с контуром отключения коррекции



**Рисунок 5 – Результаты моделирования контура отключения коррекции:**  
 а – график линейного ускорения по продольно оси ЛА; б – график угла тангажа РБСО по рисунку 2;  
 1 – текущий угол тангажа; 2 – показания РБСО



**Рисунок 6 – Результаты моделирования контура отключения коррекции, график РБСО по рисунку 4;**  
 1 – текущий угол тангажа; 2 – показания РБСО

Таким образом, модернизации РБСО в части введения температурной компенсации позволяет обеспечить повышение точности в стационарном режиме работы, а введение контура отключения коррекции обеспечивает улучшение точности при маневрировании ЛА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алалуев Р.В. и др. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В.Я. Распопова. – М.: Машиностроение, 2011. – 176 с.
2. Пешехонов, В.Г. Результаты разработки микромеханического гироскопа / В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк и др. // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4 (17). – С. 65.
3. Пешехонов, В.Г. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний / В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк и др. // Материалы XV Международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 9-15.
4. Распопов, В.Я. Влияние параметров датчиков на точность работы бесплатформенной гировертикали / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, Р.В. Алалуев, А.В. Шукалов, А.П. Шведов // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 18-21.

### Шукалов Анатолий Владимирович

ФГУП Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова, Санкт-Петербург

Заместитель генерального директора, им. П.А. Ефимова

тел.: +7 (812) 252-3817

E-mail: postmaster@elavt.spb.ru

A.V. SHUKALOV

## ACCURACY INCREASE OF RESERVE STRAPDOWN ORIENTATION SYSTEM BASED ON RUSSIAN SENSORS WITH DESIGN BY MEMS-TECHNOLOGY

*Precision increase of strapdown orientation system by including temperature correction and disconnect circuit of accelerometric correction are describe in the article.*

**Keywords:** *orientation, system, accelerometer, correction, temperature, filter.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Alaluev R.V. i dr. Mikrosistemy orientacii bespilotnyh letatel'nyh apparatov / pod red. V.Ja. Raspopova. – М.: Mashinostroenie, 2011. – 176 s.
2. Peshehonov, V.G. Rezul'taty razrabotki mikromehaničeskogo giroskopa / V.G. Peshehonov, L.P. Nesenjuk i dr. // Giroskopija i navigacija. – 2014. – № 4 (17). – S. 65.
3. Peshehonov, V.G. Inercial'nye moduli na mikromehaničeskikh datchikah. Razrabotka i rezul'taty ispytanij / V.G. Peshehonov, L.P. Nesenjuk i dr. // Materialy XV Mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam. – SPb.: CNII «Jelektroprigor», 2008. – S. 9-15.
4. Raspopov, V.Ja. Vlijanie parametrov datchikov na točnost' raboty besplatformennoj girovertikali / V.Ja. Raspopov, Ju.V. Ivanov, R.V. Alaluev, A.V. Shukalov, A.P. Shvedov // Datchiki i sistemy. – 2011. – № 8. – S. 18-21.

### Shukalov Anatolij Vladimirovich

Saint Petersburg Development Design Bureau *Electroavtomatika* named after P.A. Efimov Federal State Unitary Enterprise, St.-Petersburg

Deputy general director

tel.: +7 (812) 252-3817

E-mail: postmaster@elavt.spb.ru

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей.**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу иверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

*Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unprk.ru](http://www.gu-unprk.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

*Адрес учредителя*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 42-00-24  
Факс (4862) 41-66-84  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.  
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 14.06.2014 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,7.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.