

На правах рукописи

**Чумак Павел Васильевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПОЛЗУНА  
ТОКАРНО-КАРУСЕЛЬНЫХ СТАНКОВ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Научный руководитель:

Безъязычный Вячеслав Феоктистович, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Официальные оппоненты:

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основы проектирования машин» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Никитин Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнического университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «22» ноября 2017 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», [www.rsatu.ru](http://www.rsatu.ru).

Автореферат разослан «21» сентября 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

докт. техн. наук, профессор

Надеждин Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Машиностроение - это область по изготовлению машин, оборудования и деталей, которые эксплуатируются ежедневно: в промышленности, сельском хозяйстве, в быту и во всех средствах авто-передвижения. Таким образом, научно-технический прогресс реализуется при помощи продукции машиностроения, в особенности таких ее первоочередных отраслей как станкостроение. Научно-технический прогресс в машиностроении определяется наличием новейших технологий и станочного парка.

При металлообработке крупногабаритных деталей жесткость станка является важнейшим фактором, влияющим на точность изготовления и позиционирования исполнительных органов, таких как ползун токарно-карусельных станков и многоцелевых станочных комплексов серии VM.

На долю деформаций ползуна приходится около 20% суммарной деформации упругой системы инструмент-деталь в балансе упругих перемещений в вертикальном направлении. Деформации исполнительных механизмов существенно влияют на точность обработки. Их удельное влияние составляет от 35 до 90% от суммарной погрешности обработки.

На сегодняшний день в имеющейся литературе по проектированию токарно-карусельных станков не освещены проблемы точности позиционирования исполнительных органов, которым, в частности, является ползун с его жесткостью, податливостью и деформацией, а потому требуют дальнейшего изучения, что делает диссертационное исследование своевременным и актуальным.

**Цель работы.** Исследование влияния жесткости ползуна токарно-карусельного станка на точность обработки сложных крупногабаритных деталей, как одного из наименее жестких элементов технологической системы СПИЗ.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать теоретические положения по расчету деформаций технологической системы, в частности наиболее слабого ее звена - ползуна.
2. Определить влияние сил резания на деформацию ползуна.
3. Исследовать влияние деформации ползуна станка на точность обработки.
4. Исследовать влияние формы поперечного сечения и деформаций ползуна на точность изготовления деталей.
5. Экспериментально исследовать зависимость точности обработки крупногабаритных деталей при точении от деформации ползуна.
6. Разработать методические положения по расчетному определению погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна.

**Методы исследования.** Геометрические, кинематические и силовые характеристики системы исследовались с использованием методов теоретической и аналитической механики, сопромата, математического моделирования с целью расчетного определения погрешности обработки в технологии машиностроения. При ре-

шении поставленных задач использовались современные программные комплексы, такие как Mathcad, AutoCAD, Autodesk Inventor и SolidWorks.

**Научная новизна** выполненной диссертационной работы заключается в установлении расчетных зависимостей для определения погрешности обработки на токарно-карусельных станках, обусловленной жесткостью ползуна и учитывающих как деформацию конструктивных элементов, так и деформацию соединений.

Результаты исследования соответствуют паспорту специальности 05.02.08-технология машиностроения (п.7- технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- расчетные зависимости для определения деформации ползуна, то есть его жесткости под действием сил резания;
- расчетная зависимость для определения погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна;
- алгоритм расчета погрешности обработки, обусловленной недостаточной жесткостью ползуна;
- методические положения по расчетному определению погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна.

**Практическая ценность работы заключается в следующем:**

- разработке рекомендаций по определению деформаций ползуна на основе расчетных зависимостей;
- разработке рекомендаций по расчету деформации ползуна с применением моделирования;
- предложенной методике определения погрешности обработки, обусловленной недостаточной жесткостью ползуна.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы были представлены на всероссийских выставках и конференциях: на студенческих научных конференциях КубГТУ (Краснодар, 2012- 2014 гг.); на заседании III Конкурса молодежных научных и инновационных проектов «InnoTech 2012» (Краснодар, 2012г.); на итоговой региональной научно-практической конференции «Молодежные научно-инновационные проекты Краснодарского края», в рамках конкурса «У.М.Н.И.К.» (Краснодар, 2013 г.); на заседании конкурса «Премия IQ года» (Краснодар, 2014 г.); на шестой Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (Москва, 2014 г.); на научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» (Рыбинск, 2017г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

**Структура диссертации и аннотация глав.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит

132 страницы, 45 рисунков, 29 таблиц, 84 источника и 5 приложений.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведен анализ научной, патентной литературы и основных устройств станочных комплексов, области их применения, а также влияние жёсткости станка на точность и качество обрабатываемой поверхности.

Решением проблемы по повышению жесткости технологической системы занимались: Б.С. Балакшин, Б.М. Базров, А.М. Дальский, А.С. Проников, В.А. Кудинов, Д.Н. Решетов, В.Т. Портман, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Суслов, В.А. Тимерязев, Г.А. Шаумян, Г.М. Тромпет, В.С. Быкадов, В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, С.С. Силин, Д.В. Казаков и другие. Вопросами повышения точности обработки с помощью инструментальной техники и технологии занимались: А.Е. Древаль, Ю.И. Кузнецов, А.Р. Маслов, С.И. Лашнев, И.Л. Фадюшин, Ю.Л. Фрумин, М.И. Юликов, А.А. Рыжкин, В.Г. Солоненко и другие. Отдавая должное заслугам перечисленных выше ученых, следует отметить, что проблема влияния жесткости ползунов токарно-карусельных станков на точность обработки ранее не изучалась. Определена цель и сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** выполнен анализ условий работы ползуна и влияние режимов резания на деформацию ползуна токарно-карусельных станков.

Доказано, что одним из важных факторов, влияющих на точность изготовления, является жесткость ползуна токарно-карусельного станка. Наибольшую деформацию ползуна вызывает сила резания при различных видах токарной обработки.

При определении деформации ползуна следует рассматривать два отдельных его участка – консольная часть длиной  $L$  и часть, закрепленная в суппорте, длиной  $H$  (рисунок 1а). На рисунке 1б показана конструктивная схема установки ползуна на станке (в суппорте). Нагрузку на ползуне в каждой из главных плоскостей изгиба можно представить в виде сосредоточенной силы  $P$  и изгибающего момента  $M$  на конце ползуна. Кроме этого, вследствие, несовпадения вершины резца с осью ползуна действует крутящий момент  $T_{кр}$  (рисунок 1б).

Силы и моменты, действующие в плоскости  $UX$ , могут быть представлены следующими формулами:

$$P=P_y; \quad M=P_x \cdot h; \quad M_A = P_x \cdot h - P_y \cdot L.$$

где  $P$  и  $M$  – сила и изгибающий момент, действующий на кромку режущего инструмента;  $M_A$  – изгибающий момент, действующий в точке А и возникающий от сил  $P_y$  и  $P_x$ ;  $h$  – расстояние по оси  $Y$  от вершины резца до оси ползуна;  $L$  – вылет ползуна, м.

Силы и моменты, действующие в плоскости  $ZX$ , представлены уравнениями:

$$P=P_z; \quad M=0; \quad M_A=P_z \cdot L; \quad T_{кр} = P_z \cdot h.$$

где  $M_A$  – изгибающий момент, действующий в точке А и возникающий от силы  $P_z$ ;  $T_{кр}$  – крутящий момент, действующий на кромку режущего инструмента и возникающий вследствие несовпадения вершины резца с осью ползуна.

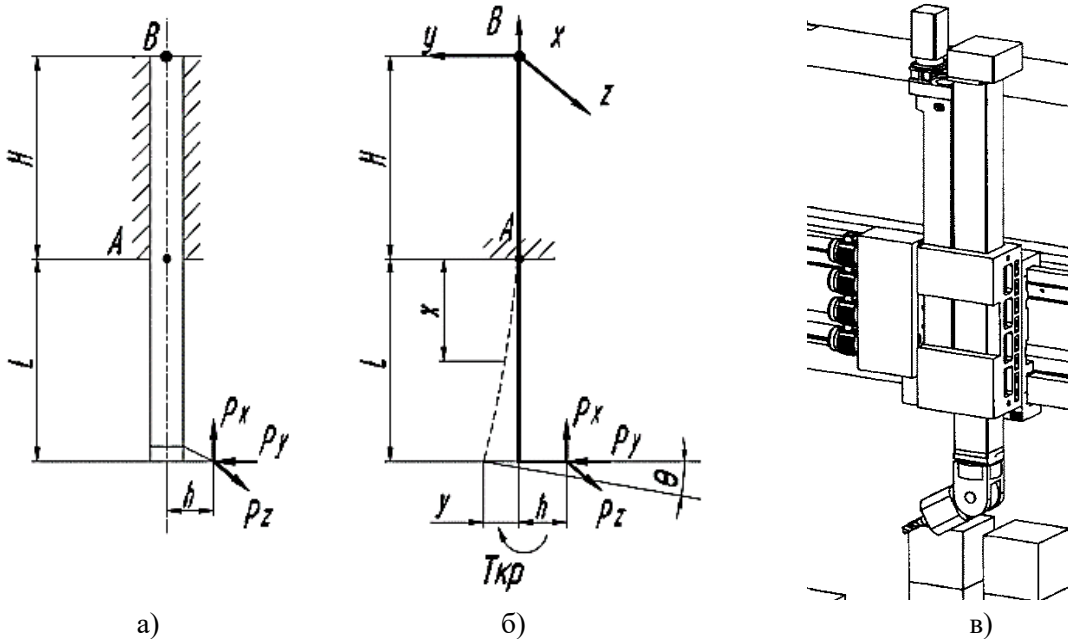


Рисунок 1 – а – исходное состояние; б – состояние ползуна под нагрузкой; в – конструктивная схема установки ползуна на станке.

Предполагая, что жесткость ползуна постоянна, приближенное дифференциальное уравнение упругой линии ползуна имеет вид:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \xi(P \cdot x - P \cdot L), \quad (1)$$

где  $x$  – произвольное расстояние от консольной заделки до вершины режущего инструмента;  $\xi$  – коэффициент, характеризующий механические свойства материала:

$$\xi = (E \cdot J)^{-1},$$

где  $E$  – модуль упругости материала ползуна 1 рода.  $J$  – осевой момент инерции площади поперечного сечения ползуна относительно рассматриваемой главной оси инерции сечения,  $m^4$ .

Проинтегрировав уравнение (1), получим уравнение для определения угла наклона  $\theta$  упругой линии, характеризующий деформацию ползуна:

$$\theta(x) = \frac{dy}{dx} = \xi \left( \frac{P \cdot x^2}{2} - M_A \cdot x \right) + \theta_0, \quad (2)$$

где  $\theta_0$  – угол наклона упругой линии у основания заделки, в точке А (рисунок 1).

Проинтегрировав уравнение  $\theta(x)$  (2), получим уравнение для определения перемещения  $y$  ползуна на расстоянии  $x$  от консольной заделки:

$$y(x) = \xi \left( \frac{P \cdot x^3}{6} - \frac{M_A \cdot x^2}{2} \right) + \theta_0 \cdot x + y_0, \quad (3)$$

где  $y_0$  – перемещения у основания заделки, точка А (рисунок 1).

Так как ось ползуна не совпадает с вершиной кромки режущего инструмента, то возникает крутящий момент, вследствие которого режущий инструмент поворачивается на угол  $\varphi$ , поэтому:

$$y(x) = \xi \left( \frac{P \cdot x^3}{6} - \frac{M_A \cdot x^2}{2} \right) + \theta_0 \cdot x + y_0 + \varphi \cdot h, \quad \text{где} \quad \varphi = \varphi_0 + \frac{T_{кр} \cdot L}{G \cdot J_{кр}},$$

где  $G$  – модуль упругости материала ползуна 2 рода;  $x$  – произвольное расстояние консольной части от точки А до вершины режущего инструмента;  $J_{кр}$  – момент инерции поперечного сечения ползуна при кручении,  $m^4$ .

Ползун в точке А находится в защемлении, поэтому принимаем его начальное перемещение  $y_0$ , угол наклона упругой линии  $\theta_0$  и угол закручивания  $\varphi_0$  равным нулю. Тогда уравнения  $\theta(x)$  и  $y(x)$  принимают конечный вид:

$$\theta = \xi \left( \frac{P \cdot L^2}{2} - M_A \cdot L \right); \quad y = \xi \left( \frac{P \cdot L^3}{6} - \frac{M_A \cdot L^2}{2} \right) + \frac{T_{кр} \cdot L}{G \cdot J_{кр}} \cdot h.$$

Так как ползун испытывает деформацию при сложном изгибе, то величину полного перемещения (прогиба) у кромки режущего инструмента (ползуна) и угол наклона упругой линии  $\theta$  определяют путем геометрического сложения векторов перемещений в направлениях главных центральных осей инерции (плоскости YX и ZX):

$$y_{\Sigma} = \sqrt{y_{xy}^2 + y_{zx}^2}; \quad (4)$$

$$\theta_{\Sigma} = \sqrt{\theta_{xy}^2 + \theta_{zx}^2}. \quad (5)$$

Удлинение ползуна  $L$  изменяется в зависимости от сложности заготовки, его интервалы могут варьироваться от 0,3 м до 1,78 м. По полученным зависимостям была рассчитана деформация ползунов с квадратным (250x250мм) и прямоугольным (250x280мм) поперечным сечением.

Как показывают расчеты, наиболее распространенная конструкция в виде правильного квадрата не является достаточно прочной с точки зрения жесткости. Прогиб у ползуна квадратного поперечного сечения на 13,4 мкм больше чем у ползуна прямоугольного поперечного сечения. При одинаковом значении длины  $L$  ползун квадратного поперечного сечения имеет большее значение деформации, чем у ползуна прямоугольного поперечного сечения.

Для проверки результатов математического расчета использовалась программа Autodesk Inventor для моделирования деформаций ползуна. Исследовались два разных сечения ползуна (квадратное и прямоугольное), при наибольшем вылете рабочей части ползуна ( $L=1780$  мм) из суппорта и получистовой обработке.

По полученным данным в расчетах податливости и прогиба ползуна при раз

личном вылете и силах резания построен график допустимых сил резания от вылета ползуна (рисунок 2). График отображает допустимую область (ниже линии), в

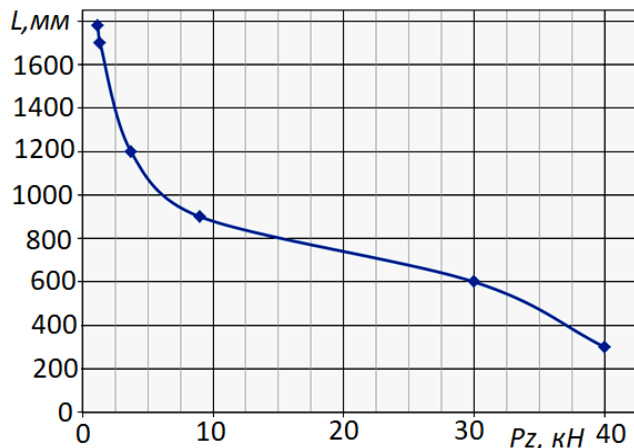


Рисунок 2 – График допустимых сил резания от величины вылета ползуна.

которой будет достигаться требуемая точность при обработке. С помощью предлагаемого метода расчета ползуна может быть проведено сравнение различных вариантов конструкций поперечного сечения ползунów с целью выявления наилучших конструктивных форм поперечного сечения. Как показывают расчеты, наиболее распространенная конструкция в виде правильного квадрата не является достаточно прочной с точки зрения жесткости. Компьютерное модели-

рование расчета жесткости ползуна подтверждает полученные ранее по математическим формулам значения деформации и прогиба ползуна с квадратным и прямоугольным профилем поперечного сечения. У ползуна с прямоугольным сечением прогиб меньше на 35-40% чем у ползуна с квадратным профилем.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований и производственных испытаний деформации ползуна токарно-карусельного станка.

Эксперименты проводились на производственной площадке станкостроительного завода им. Седина. В качестве испытательного стенда использовался токарно-карусельный станок 1 модели VM32 с жестко закрепленным на суппорте кронштейном 3 с установленным на нем индуктивным датчиком 2, который позволяет фиксировать отклонения ползуна 4 при различных режимах резания. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.

В ходе эксперимента проводились измерения деформации ползунów с помощью измерительной системы для контроля

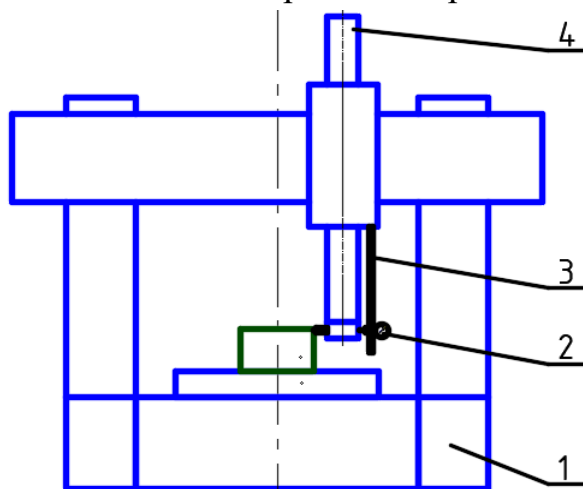


Рисунок 3 – Принципиальная схема экспериментальной установки.

деформации ползуна. Измерительная система состоит из кронштейна, индуктивного датчика линейных перемещений с преобразователем «Калибр» (модель 275), аналого-цифрового преобразователя АЦП L-264, кнопки «Запись» и ЭВМ (рисунок 4).

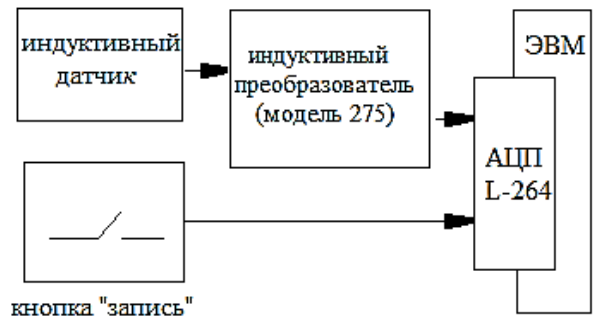
После измерений деформации полученные данные обрабатывались в программе Statistika. Результаты эксперимента с квадратным профилем поперечного сечения ползуна 250x250мм приведены на рисунке 5.

На графике приведено сравнение экспериментальных исследований и теоре-





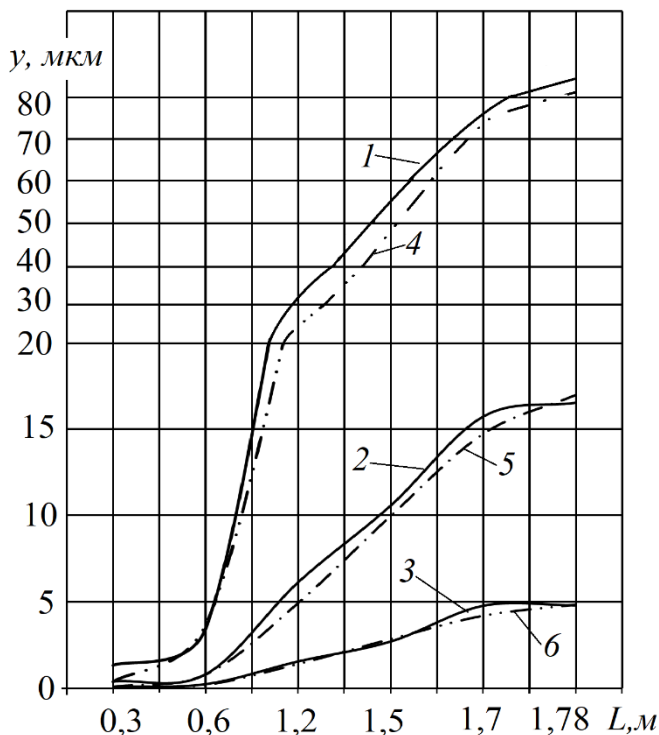
а)



б)

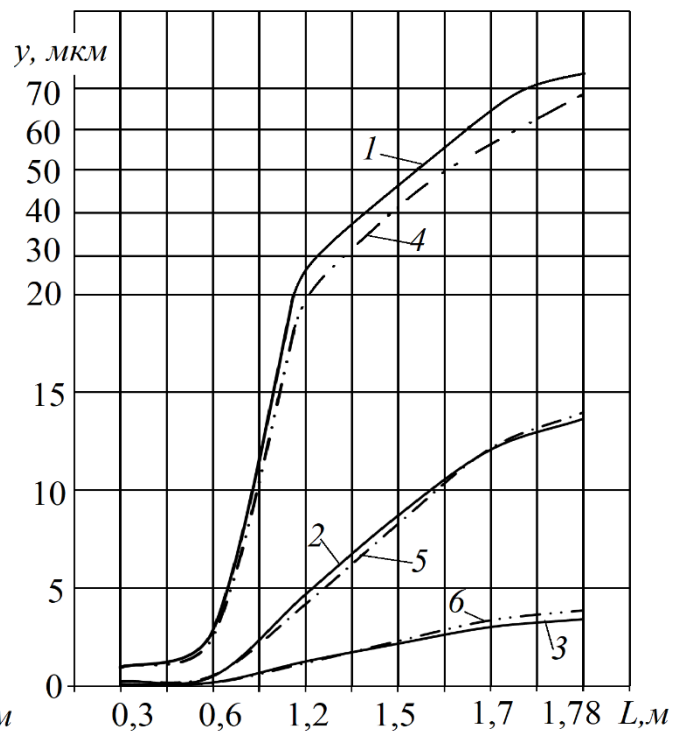
а – общий вид системы; б – схема измерительной системы.

Рисунок 4 – Функциональная схема измерительной системы для контроля прогиба ползуна. тических расчетов. Результаты эксперимента с прямоугольным профилем сечения ползуна приведены на рисунке б.



1 – перемещение exper. при  $P_z1=1843$  Н; 2 – перемещение exper. при  $P_z2=340$  Н; 3 – перемещение exper. при  $P_z3=80$  Н; 4 – перемещение теор. при  $P_z1=1843$  Н; 5 – перемещение теор. при  $P_z2=340$  Н; 6 – перемещение теор. при  $P_z3=80$  Н.

Рисунок 5 – Зависимость перемещения  $y$  ползуна сечением  $250 \times 250$  мм от вылета  $L$  при разных режимах резания  $P_z$ , в мкм.



1 – перемещение exper. при  $P_z1=1843$  Н; 2 – перемещение exper. при  $P_z2=340$  Н; 3 – перемещение exper. при  $P_z3=80$  Н; 4 – перемещение теор. при  $P_z1=1843$  Н; 5 – перемещение теор. при  $P_z2=340$  Н; 6 – перемещение теор. при  $P_z3=80$  Н.

Рисунок 6 – Зависимость перемещения  $y$  ползуна сечением  $250 \times 280$  мм от вылета  $L$  при разных режимах резания  $P_z$ , в мкм.

Проведенные экспериментальные испытания деформаций ползуна токарно-карусельного станка при токарной обработке показывают удовлетворительную сходимость теоретических расчетов и экспериментальных значений перемещений кромки режущего инструмента. Отклонение для ползуна с квадратной формой поперечного сечения составляет 15%, а для ползуна с прямоугольным сечением – 11%. Предлагаемая методика расчета (приведена в приложении к диссертации)

позволяет также выполнять количественную оценку влияния конструкции оборудования и технологические условия обработки, на точность обработки и осуществлять поиск наиболее эффективных технологических решений.

**В четвертой главе** выполнен расчет погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна, которая определяется по формуле:

$$\Delta_{Жрасчет} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{\varphi_2}, \quad (6)$$

где  $\Delta_1$  - погрешность обработки, обусловленная деформацией ползуна на участке консольной части;  $\Delta_2$  - погрешность обработки, обусловленная деформацией ползуна на участке направляющих ползуна в суппорте;  $\Delta_{\varphi_2}$  - погрешность обработки, обусловленная деформацией ползуна вследствие поворота режущей кромки резца вместе с ползуном на участке направляющих ползуна в суппорте.

Погрешность обработки  $\Delta_1$ , обусловленная деформацией ползуна на участке консольной части, учитывает погрешности, вызванные деформацией ползуна вследствие поворота резца вместе с ползуном на угол  $\theta$  и угол  $\varphi$ , и рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta_1 = y_{\Sigma} &= \sqrt{y_{xy}^2 + y_{zx}^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \xi \left( \frac{P_y \cdot L^3}{6} - \frac{(P_x \cdot h - P_y \cdot L) \cdot L^2}{2} \right) \cdot h \right]^2 + \left[ \xi \left( \frac{P_z \cdot L^3}{6} - \frac{P_z \cdot L^2}{2} \right) + \frac{P_z \cdot h \cdot L}{G \cdot J_{кр}} \cdot h \right]^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Погрешность обработки  $\Delta_2$ , обусловленная деформацией ползуна на участке направляющих ползуна в суппорте, учитывает погрешности вызванные прогибом  $y_0$  и деформацией ползуна вследствие поворота резца вместе с ползуном на угол  $\theta_0$  и рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta_2 = y_0 &= \sqrt{y_{xy}^2 + y_{zx}^2} = \sqrt{[y'_{0xy} + \theta_{0xy} \cdot L]^2 + [y'_{0zx} + \theta_{0zx} \cdot L]^2} = \\ &= \sqrt{\left[ \frac{2\beta \cdot k}{B} [P_y - (P_x \cdot h - P_y \cdot L)\beta] + L \left( \frac{2\beta^2 \cdot k}{B} [P_y - 2(P_x \cdot h - P_y \cdot L)\beta] \right) \right]^2 +} \\ &+ \left[ \frac{2\beta \cdot k}{B} [P_z - (P_z \cdot L)\beta] + L \left( \frac{2\beta^2 \cdot k}{B} [P_z - 2(P_z \cdot L)\beta] \right) \right]^2} \end{aligned} \quad (8)$$

где  $B$  – ширина направляющих,  $m$ ;  $k$  – коэффициент контактной податливости, принимают одинаковым для всех конструкций ползунов,  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/H$ ;

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{B}{4E \cdot k \cdot J}}, \frac{1}{m}$$

Погрешность обработки  $\Delta_{\varphi_2}$ , обусловленная деформацией ползуна вследствие поворота режущей кромки резца вместе с ползуном на участке направляющих пол-

зуна в суппорте, рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\varphi_2} = \varphi_0 = \frac{T_{кр}}{G \cdot J_{кр} \cdot \beta_k \cdot w}, \quad (9)$$

где  $w$  – поправочный коэффициент, зависящий от профиля сечения ползуна, для ползуна с квадратным профилем  $w=1$ , для прямоугольным  $w=1,1$ ;

$$\beta_k = \sqrt{\frac{\sum b_i (r_i^2 + \frac{b_i^2}{12})}{G \cdot J_{кр} \cdot k}}$$

Расчет значения погрешностей по формулам (6)...(9), с использованием электронно-вычислительных устройств не представляет сложности, но для более быстрой оценки этой погрешности и использования результатов в производстве целесообразно получить более простую зависимость.

Для ползуна прямоугольного поперечного сечения при построении зависимости  $\Delta_{ж}$  от длины вылета инструмента  $L$  в двойной логарифмической системе координат (рисунок 7) формула будет иметь следующий вид:

$$\Delta_{ж} = C \cdot L^X, \quad (10)$$

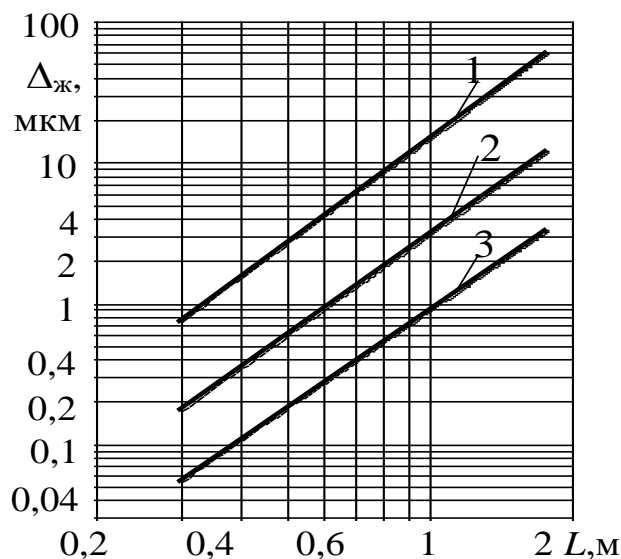
где  $C$  – значение  $\Delta_{ж}$  при  $L=1м$ ;  $X$  – тангенс угла наклона линий 1, 2 и 3 к оси  $L$  линии, характеризующей зависимость  $\Delta_{ж}$  от  $L$ .

Графики на рисунке 7 построены на основе расчётов по теоретическим формулам значений  $\Delta_{ж}$  от  $L$ . Тогда получим следующие зависимости:

$$1 - P_z = 1843 \text{ Н}; \quad \Delta_{ж} = 14,611 \cdot L^{2,4797}; \quad R^2 = 0,9766;$$

$$2 - P_z = 340 \text{ Н}; \quad \Delta_{ж} = 3,054 \cdot L^{2,396}; \quad R^2 = 0,9766;$$

$$3 - P_z = 80 \text{ Н}; \quad \Delta_{ж} = 0,881 \cdot L^{2,315}; \quad R^2 = 0,9765,$$



1 – погрешность при  $P_{z1}=1843 \text{ Н}$ ; 2 – погрешность при  $P_{z2}=340 \text{ Н}$ ; 3 – погрешность при  $P_{z3}=80 \text{ Н}$ .

Рисунок 7 – Зависимость  $\Delta_{ж}$  от  $L$  для ползуна прямоугольного поперечного сечения.

где  $R^2$  – коэффициент детерминации.

Как видно из рисунка 7, значения  $C$  и  $X$  зависят от силы резания  $P_z$ . Построив зависимость  $C$  и  $X$  от значения  $P_z$  в двойной логарифмической системе координат, получим  $C = 0,017P_z^{0,9}$  при  $R^2=0,9995$  и  $X = 2,1P_z^{0,022}$  при  $R^2 = 0,998$ .

Тогда уравнение для определения суммарной погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна прямоугольного поперечного сечения:

$$\Delta_{ж\text{прям}} = 0,017P_z^{0,9} \cdot L^{2,1P_z^{0,022}} \quad (11)$$

Аналогично получено уравнение для

определения суммарной погрешности обработки для ползуна с квадратным профилем поперечного сечения:

$$\Delta_{Жквдр} = 0,0204 P_z^{0,9072} \cdot L^{2,176} P_z^{0,0145} \quad (12)$$

На рисунке 8 представлен алгоритм расчетного определения погрешности обработки поверхностей при токарной обработке, в котором для выполнения расчетов используются ранее полученные зависимости.

Разработанный алгоритм позволяет выполнять выбор режима резания для достижения заданной точности изготовления крупногабаритных деталей.

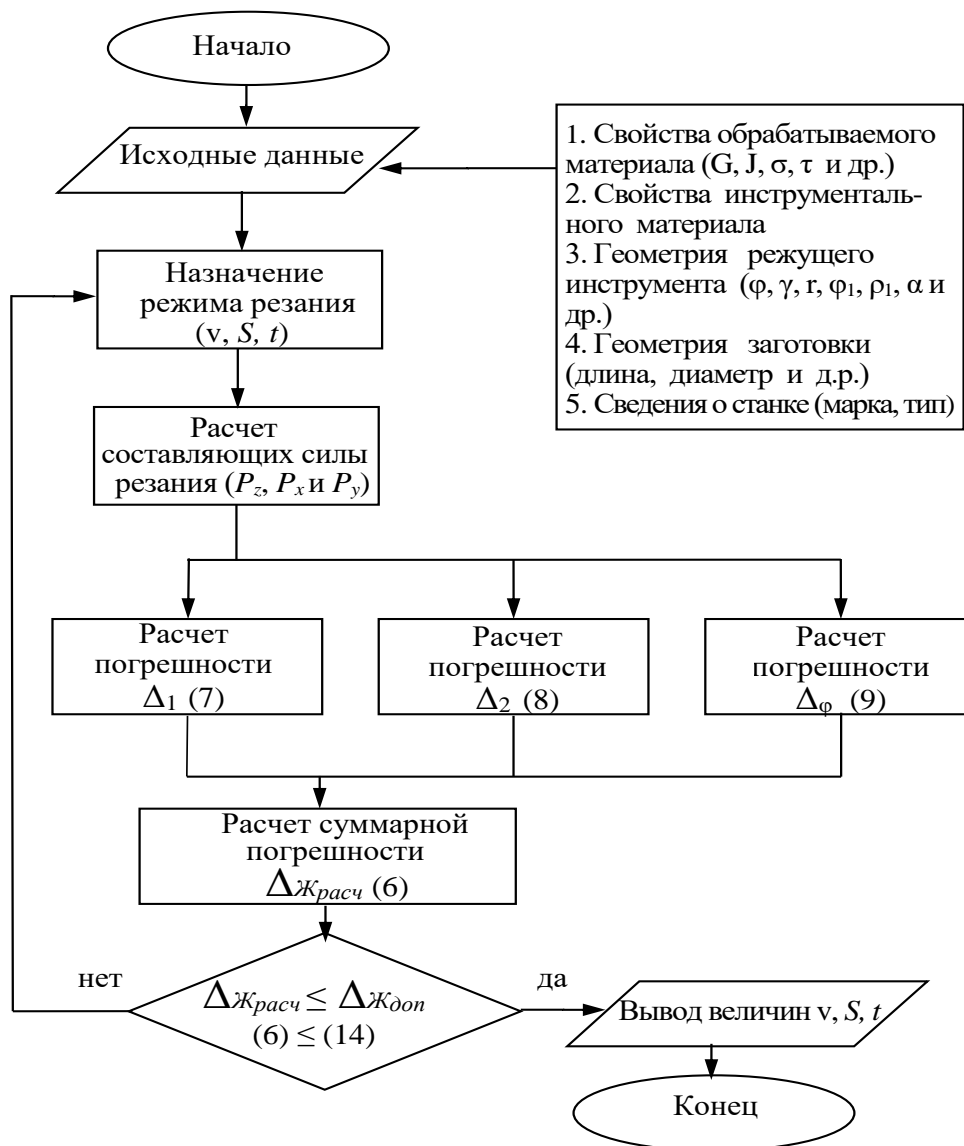


Рисунок 8 – Алгоритм для определения погрешности обработки, обусловленной жесткостью ползуна токарно-карусельного станка.

После получения исходных данных о геометрии режущего инструмента, а также о характеристике станка, свойствах обрабатываемого и инструментального материалов и размерах детали назначаются режимы резания и выполняется расчет составляющих сил резания  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ , возникающих вследствие механической об-

работки. По полученным значениям сил резания производится расчет: погрешности  $\Delta_1$  обработки, обусловленной деформацией ползуна на участке консольной части; погрешности  $\Delta_2$  обработки, обусловленной деформацией ползуна на участке направляющих ползуна в суппорте и погрешности  $\Delta_{\varphi_2}$  обработки, обусловленной деформацией ползуна вследствие поворота режущей кромки резца вместе с ползуном на участке направляющих ползуна в суппорте.

Суммирование общей погрешности осуществляется алгебраически, так как некоторые составляющие могут увеличивать погрешность, а другие уменьшать, в зависимости от режимов резания и характеристик режущего инструмента:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\mathcal{J}} - \Delta L_p - \Delta R_H + \Delta_{изн}, \quad (13)$$

где  $\Delta L_p$  и  $\Delta R_H$  – погрешности обработки, обусловленные температурными деформациями режущего инструмента и обрабатываемой заготовки;  $\Delta_{изн}$  – погрешность, обусловленная износом режущего инструмента. Значения  $\Delta L_p$ ,  $\Delta R_H$  и  $\Delta_{изн}$  в данной работе определялись по формулам В.Ф. Безъязычного.

Полученное значение суммарной погрешности сравнивается с допустимой и если условие не выполняется, тогда решается задача по изменению режима резания с дальнейшим пересчетом суммарной погрешности. Задача решается до получения значения погрешности  $\Delta_{\Sigma}$  равной или меньше требуемого значения.

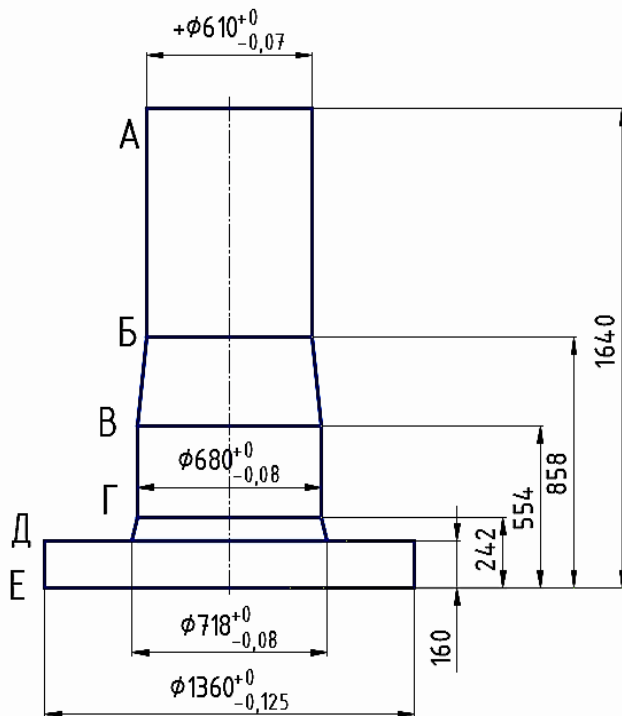


Рисунок 9 – Эскиз вала ротора генератора ветротурбины ВК50.

Обрабатываемый материал сталь 38ХНЗМФА, марка режущей части Т15К6.

Допустимое значение погрешности

$\Delta_{\mathcal{J}доп}$ , свойственное методу обработки, может быть определено по следующей зависимости:

$$\Delta_{\mathcal{J}доп} = \Delta'_{\Sigma} + \Delta L_p + \Delta R_H - \Delta_{изн}, \quad (14)$$

где  $\Delta'_{\Sigma}$  – погрешность метода обработки.

По данным расчетным зависимостям были определены составляющие погрешности обработки вала ротора генератора (рисунок 9). Результаты расчета представлены в таблице 1.

По зависимостям (11) и (14) были рассчитаны погрешности  $\Delta_{\mathcal{J}}$  и  $\Delta_{\mathcal{J}доп}$  обработки вала ротора генератора, результаты представлены в таблице 2.

Геометрия режущей части резца:  $\alpha = \gamma = 10$  град;  $\varphi = \varphi_1 = 45$  град;  $r = 10^{-3}$  м;  $\rho_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  м. Обработка выполнялась при трех вариантах режима резания:  
 1 -  $v = 3,33$  м/с,  $S = 5 \cdot 10^{-4}$  м/об,  $t = 10^{-3}$  м; 2 -  $v = 3,33$  м/с,  $S = 2 \cdot 10^{-4}$  м/об,  $t = 10^{-3}$  м;  
 3 -  $v = 3,0$  м/с,  $S = 6 \cdot 10^{-4}$  м/об,  $t = 3 \cdot 10^{-4}$  м.

Таблица 1 – Результаты расчета составляющих погрешностей обработки

$d, м$	$L, м$	вариант 1				вариант 2				вариант 3			
		$\Delta_{Ж\text{прям}1}$ мкм	$\Delta L_{p1}$ мкм	$\Delta R_{Н1}$ мкм	$\Delta_{изв3}$ мкм	$\Delta_{Ж\text{прям}2}$ мкм	$\Delta L_{p2}$ мкм	$\Delta R_{Н2}$ мкм	$\Delta_{изв3}$ мкм	$\Delta_{Ж\text{прям}3}$ мкм	$\Delta L_{p3}$ мкм	$\Delta R_{Н3}$ мкм	$\Delta_{изв3}$ мкм
0,61	$L_{AB}=0,782$	3,85	68,79	3,9	0,01	1,83	44,29	3,76	0,02	0,3	22,8	3,17	24,24
0,68	$L_{BG}=0,312$	13,22	66	3,57	0,006	6,16	41,1	3,44	0,01	0,95	19,54	2,91	10,78
0,136	$L_{DE}=0,16$	18,81	47,13	2,03	0,005	8,7	18,8	1,95	0,008	1,33	3,72	1,65	8,98

Таблица 2 – Результаты расчета погрешности, обусловленной жесткостью ползуна

$d, м$	$L, м$	вариант 1		вариант 2		вариант 3	
		$\Delta_{Ж1}$ мкм	$\Delta_{Ждоп1}$ мкм	$\Delta_{Ж2}$ мкм	$\Delta_{Ждоп2}$ мкм	$\Delta_{Ж3}$ мкм	$\Delta_{Ждоп3}$ мкм
0,61	$L_{AB}=0,782$	3,85	147,32	1,83	6,97	0,3	33,27
0,68	$L_{BG}=0,312$	13,22	180,43	6,16	17,97	0,95	28,33
0,136	$L_{DE}=0,16$	18,81	320,4	8,7	52,97	1,33	50,83

Сравнивая полученные значения погрешности обработки для трех режимов резания  $\Delta_{Ж} \leq \Delta_{Ждоп}$  видим, что неравенство выполняется для всех режимов резания. Режимы резания при токарной обработке обеспечат заданную точность обработки детали при условии соблюдения неравенства. В случае когда неравенство не выполняется следует изменить режим резания, уменьшив подачу и глубину резания.

Результаты исследования могут быть использованы при определении точности обработки на действующем оборудовании или для повышения жесткости металлорежущих станков при разработке их конструкции.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе экспериментальных и теоретических исследований, а также производственных испытаний были получены следующие результаты:

1. Выполненный анализ научной, патентной литературы и производственных сведений показал, что на сегодняшний день в имеющейся литературе по проектированию токарно-карусельных станков не освещены проблемы точности обработки деталей и погрешности обработки, обусловленные недостаточной жесткостью ползуна при обработке крупногабаритных деталей.

2. Важным показателем, влияющим на производительность и точность обработки токарно-карусельных станков, является жесткость технологической системы. Деформации исполнительных механизмов в большой степени влияют на параметр точности обработки крупногабаритных деталей и их удельное влияние составляет (35-90%) от суммарной погрешности обработки.

3. Полученные расчетные зависимости (2.4), (2.5) и (2.6) позволяют определять деформацию ползуна на участке консольной части, а расчетные зависимости (2.21) и (2.23) позволяют определять деформацию ползуна на участке, закрепленном в суппорте. Как показывают расчеты, прогиб у ползуна квадратного поперечного сечения на 13,4 мкм больше, чем у ползуна прямоугольного поперечного сечения.

4. Компьютерное моделирование расчета жесткости ползуна подтверждает, полученные ранее по математическим формулам, значения деформации и прогиба ползуна с квадратным и прямоугольным профилем поперечного сечения. У ползуна с прямоугольным сечением прогиб меньше на 35-40%, чем у ползуна с квадратным профилем.

5. Установленная зависимость формирования погрешности, обусловленной недостаточной жесткостью ползуна, позволяет определить суммарную погрешность обработки крупногабаритных деталей в токарном режиме работы токарно-карусельных станков.

6. Разработанный алгоритм определения погрешности обработки позволяет выполнять назначение режима резания для достижения заданной точности обработки.

7. Разработанные рекомендации по проектированию ползунов и алгоритма расчета погрешности обработки поверхностей при токарной обработке, позволяют уменьшить суммарную погрешность обработки и повысить точность изготовления деталей.

8. Полученные на основе экспериментальных исследований формулы, отражающие взаимосвязь составляющей силы резания и удлинения ползуна из закрепленной части суппорта, показывают удовлетворительную сходимость теоретических расчетов и экспериментальных значений перемещений кромки режущего инструмента. Деформация для ползуна квадратной формы поперечного сечения составляет 15%, а для ползуна с прямоугольным сечением – 11%.

9. Предлагаемая методика расчета погрешности обработки позволяет также выполнять количественную оценку влияния конструктивных особенностей оборудования и технологии процесса обработки, включая режимы резания и параметры заготовки, на точность обрабатываемых деталей и осуществлять наиболее эффективные технологические решения.

#### **Основные публикации по теме диссертационной работы**

##### ***Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:***

1. **Безъязычный, В.Ф.** Деформация ползуна токарно-карусельного станка серии VM32 / В.Ф. Безъязычный, П.В. Чумак / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. Рыбинск, 2016. №3 – С.20 - 24.

2. **Безъязычный, В.Ф.** Деформации направляющих ползуна в станочном комплексе. В.Ф. Безъязычный, П.В. Чумак / Вестник Рыбинского государственного

авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – Рыбинск, 2017. №1 – С.87-92.

3. **Бережной, С.Б.** Влияние деформации ползуна многоцелевого станочного комплекса серии VM на точность обработки. / С.Б. Бережной, П.В. Чумак // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар: КубГАУ, 2015. №07(111). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/07/pdf/55.pdf>.

4. **Бережной, С.Б.** Зависимость деформации ползуна и точности обработки на многоцелевом станочном комплексе серии VM / Бережной С.Б., Чумак П.В. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №04(118). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/52.pdf>.

*Публикации в других изданиях:*

5. **Безъязычный, В.Ф.** Ползун токарно-карусельного станка / В.Ф. Безъязычный, П.В. Чумак, // Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященная 56-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос, КВВАУЛ им. А.К. Серова, 2017. – С.241–246.

6. **Безъязычный, В.Ф.** Деформации направляющих ползуна в станочном комплексе / В.Ф. Безъязычный, П.В. Чумак, // Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященная 56-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос, КВВАУЛ им. А.К. Серова, 2017. – С.247–252.

7. **Чумак, П.В.** Методика расчета деформаций ползуна токарно-карусельного станка. / П.В. Чумак, И.А. Чумак // Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции «Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского». Министерство обороны Российской Федерации, КВВАУЛ им. А.К. Серова. 2017. С. 323-324.

8. **Чумак, П.В.** Факторы, влияющие на точности обработки в станочных комплексах / П.В. Чумак, И.А. Чумак // Сборник научных статей VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященная 55-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос, КВВАУЛ им. А.К. Серова, 2016. – С.241–246.

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать 20.09.2017г. Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100. Заказ №90.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева (РГАТУ имени П.А. Соловьева)

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьева, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53