

На правах рукописи

**Кожина Светлана Михайловна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК И МОНОКОЛЕС  
ГТД КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2019

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

Научный руководитель: **Волков Дмитрий Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Мехатронные системы и процессы  
формообразования имени С. С. Силина»

Официальные оппоненты: **Гусев Владимир Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»;

**Унянин Александр Николаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 11 июня 2019 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.210.01 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 на сайте [www.rsatu.ru](http://www.rsatu.ru) и в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева».

Автореферат разослан 10 апреля 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент

И. В. Надеждин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Концевое фрезерование находит применение при производстве деталей газотурбинных двигателей в авиационном, энергетическом и транспортном машиностроении. Наиболее массовыми деталями, обрабатываемыми различными концевыми фрезами, являются лопатки компрессора и моноколес, в частности, поверхности их проточной части. Геометрические параметры таких поверхностей отличаются высокими требованиями к геометрической точности и шероховатости. Стремление конструкторов ГТД к повышению газодинамических характеристик лопаточных венцов приводит к тому, что усложняется профиль и закрутка лопаток, а также постоянно снижается максимальная толщина аэродинамического профиля. При этом снижается жесткость детали, и появляются сложности ее механической обработки.

Одним из широко распространенных методов обработки проточной части лопаток компрессоров ГТД и крыльчаток моноколес является концевое фрезерование на станках с ЧПУ. Точность обработки таких поверхностей определяется по отношению к базовым элементам лопатки в определенных сечениях. Отклонения показателей точности и шероховатости от заданных значений могут быть связаны с деформациями детали и инструмента, а также износом режущего инструмента, наступающим до окончания полного цикла обработки. Такой износ происходит в результате воздействия на режущий клин высоких переменных температур и вибраций.

При концевом фрезеровании поверхностей проточной части лопаток и моноколес ГТД в заготовках из труднообрабатываемых материалов составляющие силы резания воздействуют на участки профиля, обладающие различной жесткостью. Деформация детали и инструмента является причиной отклонения от заданной сформированной поверхности. В настоящее время отсутствуют методики расчета деформаций и соответствующих им допустимых значений глубины резания и подачи, что приводит к необходимости назначения режимов резания на основе производственного опыта, результатов предварительных исследований и требует существенных материальных затрат. Поэтому разработка аналитической модели обработки маложесткой проточной части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами представляет решение актуальной задачи для теории и практики механической обработки.

**Цель работы** состоит в повышении эффективности обработки маложестких поверхностей проточной части лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами посредством оптимизации технологических параметров.

Для достижения цели работы в диссертации решались **следующие задачи:** 1. Разработать математическую модель формирования стружки при концевом

вом фрезеровании инструментом с радиусной рабочей поверхностью применительно к обработке криволинейных (выпуклых и вогнутых) поверхностей.

2. Разработать математическую модель расчета составляющих силы резания и температуры применительно к условиям концевое фрезерования деталей, имеющих малую жесткость. Определить деформации компонентов технологической системы в зависимости от схемы закрепления детали.

3. Разработать динамическую модель процесса концевое фрезерования деталей при переменной жесткости с учетом режимов обработки и характеристик инструмента. Определить зону устойчивости процесса обработки.

4. Провести экспериментальные исследования силовых и температурных зависимостей от режимов резания при концевом фрезеровании для группы титановых сплавов.

5. Разработать методику и алгоритм оптимизации технологических операций концевое фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД по заданным критериям.

6. Разработать практические рекомендации по концевому фрезерованию моноколес и лопаток компрессора ГТД.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки.** Соответствует пункту **2** - «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки», **3** - «Исследование механических и физико-технических процессов», **4** - «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента»

**Методы исследования.** В основе теоретических исследований лежит теория резания, теория упругости, теория автоматического управления. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на современном оборудовании с использованием методов планирования эксперимента. При обработке экспериментальных данных применялись методы статистической обработки результатов.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель формирования стружки при концевом фрезеровании инструментом с радиусной рабочей поверхностью при движении подачи по криволинейной траектории;
- математическая модель расчета составляющих силы резания и температуры применительно к условиям концевое фрезерования;
- модели деформации детали в зависимости от схемы закрепления;
- динамическая модель процесса концевое фрезерования деталей с переменной жесткостью, позволяющая определить зону устойчивости процесса обработки;

- результаты экспериментальных исследований силовых и температурных зависимостей от режимов резания при концевом фрезеровании для группы титановых сплавов;

- методика и алгоритм оптимизации технологических операций концевой фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД по заданным критериям;

- практические рекомендации по концевому фрезерованию моноколес и лопаток компрессора ГТД в машиностроительном производстве.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель концевой фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД, учитывающая динамику процесса обработки маложестких поверхностей. В том числе:

- разработана математическая модель формирования стружки при концевом фрезеровании инструментом с радиусной рабочей поверхностью при движении подачи по криволинейной;

- разработана математическая модель расчета составляющих силы резания и температуры применительно к условиям концевой фрезерования;

- разработаны модели деформации детали в зависимости от схемы закрепления;

- разработана динамическая модель процесса концевой фрезерования деталей с переменной жесткостью, позволяющая определить зону устойчивости процесса обработки;

- получены экспериментальные исследования силовых и температурных зависимостей от режимов резания при концевом фрезеровании для группы титановых сплавов.

**Практическая значимость.** В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны методика и алгоритм оптимизации технологических операций концевой фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД, обеспечивающие получение минимальной себестоимости обработки при заданных ограничениях. Система ограничений учитывает конструкцию и динамические характеристики детали, инструмента и технологического оборудования. Определены зоны устойчивости процесса обработки, которые позволили разработать рекомендации, к режимам реализации процесса, конструктивным параметрам инструмента и оборудования.

**Реализация результатов работы.** Основные положения диссертации проверены и реализованы на ПАО «ОДК - Сатурн» при разработке и оптимизации технологических операций концевой фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов. Результаты работы используются в учебном процессе.

**Апробация результатов работы.** Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались в рамках III и IV Международных техно-

логических форумов «Инновации. Технологии. Производство» в 2016 и 2017 г.г., научно-техническом конгрессе по двигателестроению в 2018 г. «Двигатель-2018» и других международных и всероссийских конференциях.

**Публикации.** Результаты исследований представлены в 4 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 тезисах докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы 176 страниц, 110 рисунков, 14 таблиц и 116 наименований литературы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, методы исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость и апробация работы.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния производства деталей ГТД. Приведены особенности конструкций и технологии изготовления лопаток и моноколес ГТД, определены требования к технологическому процессу, оборудованию и инструменту и направления развития, показаны результаты научных исследований в области концевой фрезеровки и потери устойчивости при механической обработке. Научными исследованиями в области фрезеровки, в том числе концевыми фрезами занимались: Бердников Л.Н., Безъязычный В. Ф., Елкин М. С., Мезенцев М. О., Полетаев В.А., Станкевич С. А., Сунгатов И. З., Чемборисов Н. А., Antoniadis A., Chung-Liang, Soo S. и др.

В области исследований динамики процесса резания, в том числе динамики фрезеровки значительный вклад внесли: Бржозовский Б. М., Вейц В. Л., Воронов С. А., Городецкий Ю. И., Жарков И. Г., Заре В.В., Заковоротный В.Л., Каширин А. И., Кудинов В. А., Эльясберг М. Е., Tobias S. A., Minis I. и др.

Показано, что появление вибраций приводит к снижению стойкости инструмента, и значительно снижает качество обработки детали.

На основании анализа литературы определены цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели процесса концевой фрезеровки деталей с малой жесткостью. Аналитически исследованы закономерности формирования геометрических параметров срезов. Разработаны математические модели для определения составляющих силы резания и температуры в режущем клине, которые позволяют установить ограничения по теплостойкости и запасу хрупкой прочности инструмента.

Моделирование процессов в зоне стружкообразования позволило получить зависимости для определения составляющих силы резания. Схема для пересчета составляющих силы резания с учетом углов на концевой фрезе представлена на рис. 1. В соответствии с приведенной схемой на концевой фрезе ре-

ализуется косоугольное резание, при котором появляется осевая составляющая силы, действующая вдоль оси инструмента.

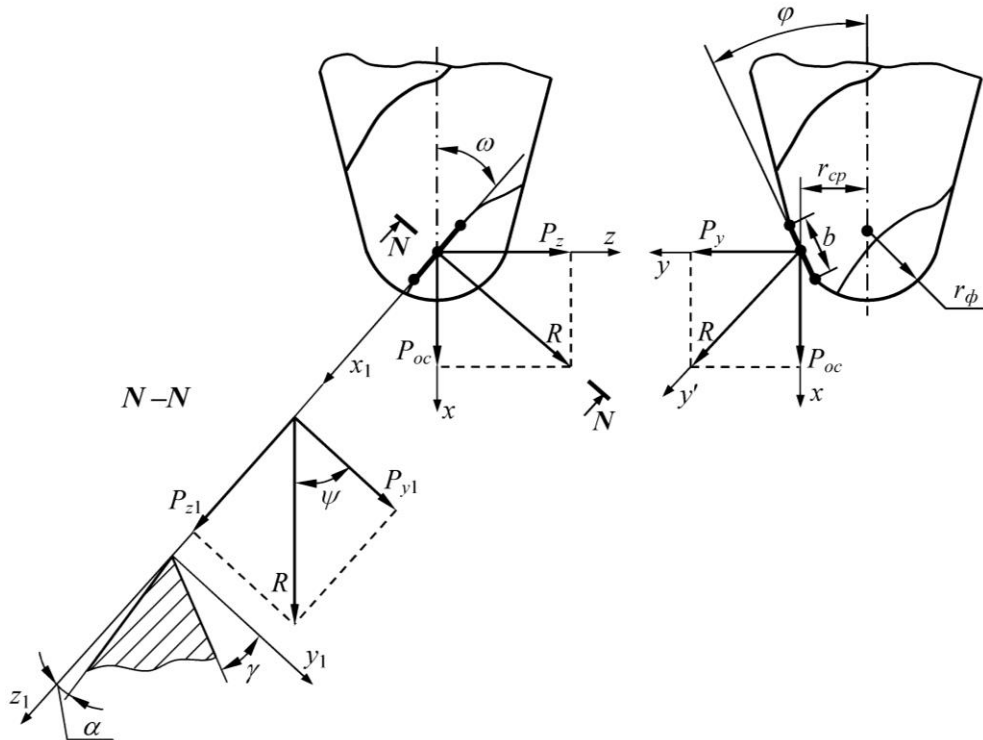


Рис. 1 – Схема определения составляющих силы резания

Составляющие силы резания определялись по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_{oc} &= P_x = R \cdot (\sin \varphi \cdot \cos \omega + \cos \varphi \cdot \sin \omega); \\ P_z &= R \cdot (\sin \psi \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega - \sin \varphi \cdot \sin \omega); \\ P_y &= R \cdot (\cos \psi \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \omega), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R = \sqrt{P_{z1}^2 + P_{y1}^2}$  – равнодействующая силы резания;  $\psi = \arctg(P_{z1}/P_{y1})$  – угол между равнодействующей  $R$  и составляющей  $P_{y1}$ ;  $\omega$  – угол наклона винтовой линии стружечных канавок фрезы;  $\varphi$  – угол наклона рабочего участка концевой фрезы на радиусе  $r_{cp}$ .

Выполнены расчеты деформации детали при фрезеровании. Перо лопатки моноколеса можно представить в виде консольно-закрепленной балки длиной  $l$ . Схема расчета деформаций пера лопатки представлена на рис. 2. Под действием силы резания  $P_P = \sqrt{P_{oc}^2 + P_z^2 + P_y^2}$  происходит изгиб и скручивание пера лопатки. Сила резания  $P_P$  в процессе обработки может быть приложена к любой точке пера лопатки.

Максимальная деформация наблюдается при обработке крайних точек пера, при  $c = l$  и  $a = h$ , которая определялась по формуле

$$\delta_{\max} = \frac{P_p \cos \alpha_1 \cdot l^3}{3EJ_x} \left( 1 + \frac{3EJ_x h^2}{GJ_k l^2} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – угол наклона силы резания к оси  $y$  (см. рис. 2);  $E$  – модуль упругости материала лопатки, МПа;  $J_x$  – осевой момент инерции профиля пера лопатки,  $\text{м}^4$ ;  $h$  – половина ширины пера лопатки (см. рис. 2), м;  $G$  – модуль сдвига, МПа;  $J_k$  – геометрическая характеристика жесткости сечения при кручении,  $\text{м}^4$ .

Результаты расчета деформации пера лопатки при ее консольном закреплении от силы фрезерования представлены на рис. 3.

Другая схема обработки применяется при фрезеровании лопаток компрессора. Базирование детали при обработке предполагает поджим пера лопатки центром. Схема взаимных перемещений инструмента и заготовки представлена на рис. 4, а результаты расчета деформации пера лопатки для рассматриваемого способа базирования – на рис. 5.

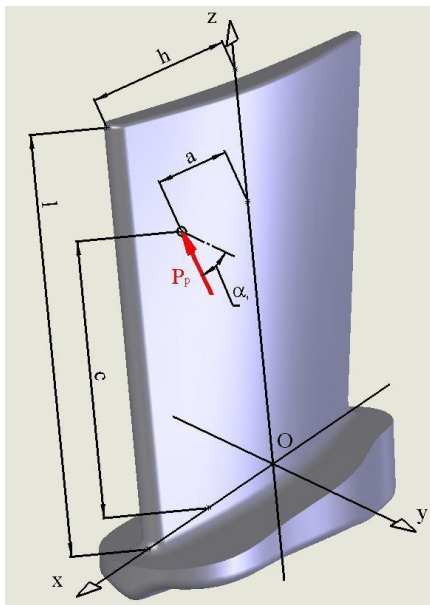


Рис. 2 – Схема расчета деформаций

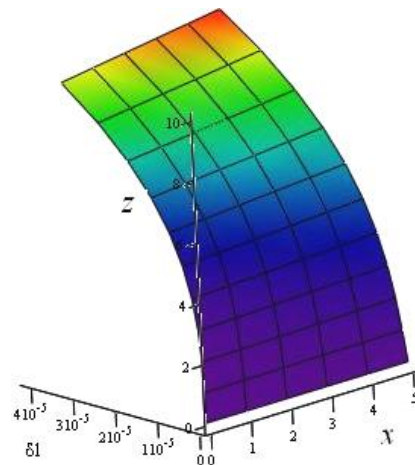


Рис. 3 – Деформации пера лопатки при консольном закреплении, ось  $x$  ( $h=20\text{мм}$ ); ось  $z$  ( $l=100\text{мм}$ )

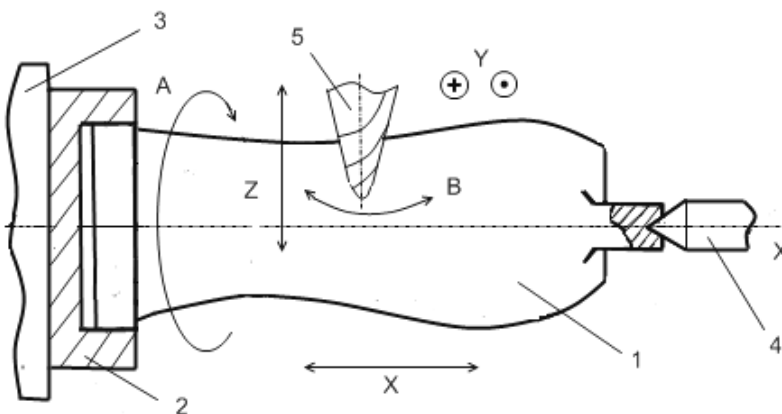


Рис. 4 – Схема взаимных перемещений инструмента и заготовки при фрезеровании проточной части лопатки, где: 1 – заготовка; 2 – приспособление; 3 – планшайба передней бабки; 4 – центр задней бабки; 5 – инструмент

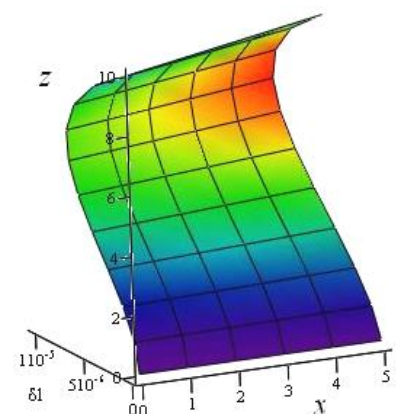


Рис. 5 – Деформации пера лопатки при консольном закреплении и поджиме задним центром



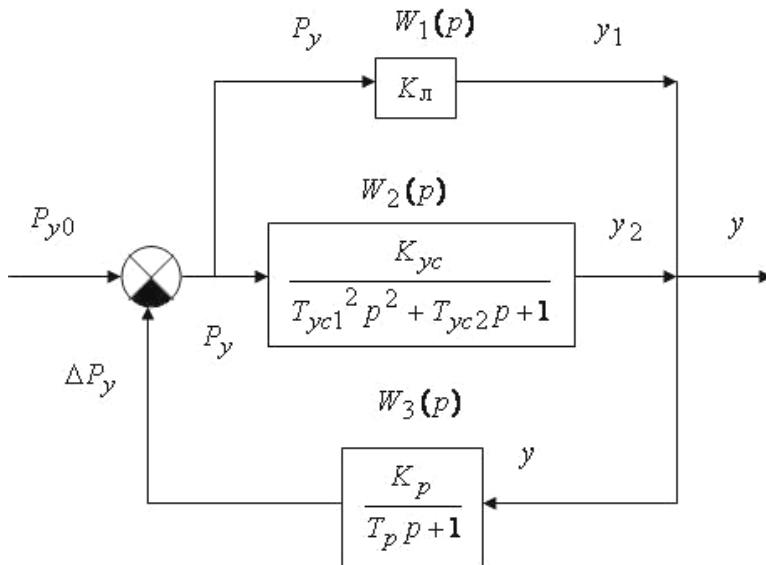
Для обеспечения требуемой точности механической обработки величина максимально допустимой деформации лопатки при фрезеровании  $\delta_{\max}$  должна быть меньше допуска на геометрический размер

$$\delta_{\max} \leq kT_{on}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент использования допуска (значение  $k$  при обработке резанием обычно принимают равным  $0,3 \dots 0,7$ );  $T_{on}$  – технологический допуск.

Технологическая система при концевом фрезеровании лопаток находится под действием изменяющихся во времени динамических воздействий. Под действием изменяющихся деформаций системы изменяется сечение среза, что приводит к изменению силы резания. Такое поведение системы может приводить к развитию автоколебаний и неустойчивости процесса, снижению стойкости инструмента и качества обработки.

Наиболее заметное влияние на динамику процесса обработки концевыми фрезами оказывает жесткость детали, которая изменяется при перемещении фрезы по перу лопатки. В этом случае изменения жесткости детали накладывают ограничения на область допустимых режимов обработки. Структурная схема системы, в состав которой входит нежесткая деталь, представлена на рис. 6.



$P_y$  – сила резания;  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ ,  $W_3(p)$  – передаточные функции;  $K_л$  – коэффициент передачи;  $K_{yc}$  – приведенная статическая характеристика упругой системы станка;  $T_{yc1}$  – инерционная постоянная времени;  $T_{yc2}$  – постоянная времени демпфирования;  $K_p$  – статический коэффициент усиления;  $T_p$  – постоянная времени стружкообразования

Рис. 6 – Структурная схема динамической системы, учитывающая жесткость пера лопатки

Система состоит из передаточных функций, моделирующих деформации пера лопатки и эквивалентной упругой системы станка, а также процесса резания, формирующего обратную связь в системе. Входным воздействием является сила резания, выходным – суммарная деформация упругой системы.

Передаточная функция эквивалентной упругой системы принималась в виде колебательного звена, а передаточная функция процесса резания – в виде инерционного звена.

Обрабатываемая поверхность пера лопатки, как правило, имеет малую толщину и массу, поэтому пе-

редаточная функция лопатки принималась в виде безинерционного звена с коэффициентом передачи  $K_l$ . Данный коэффициент характеризует податливость пера лопатки и при консольной схеме обработки его наибольшее значение определяется зависимостью

$$K_l = \frac{l^3}{3EJ_x} + \frac{h^2}{GJ_p}, \quad (4)$$

где  $J_p$  – полярный момент инерции профиля пера.

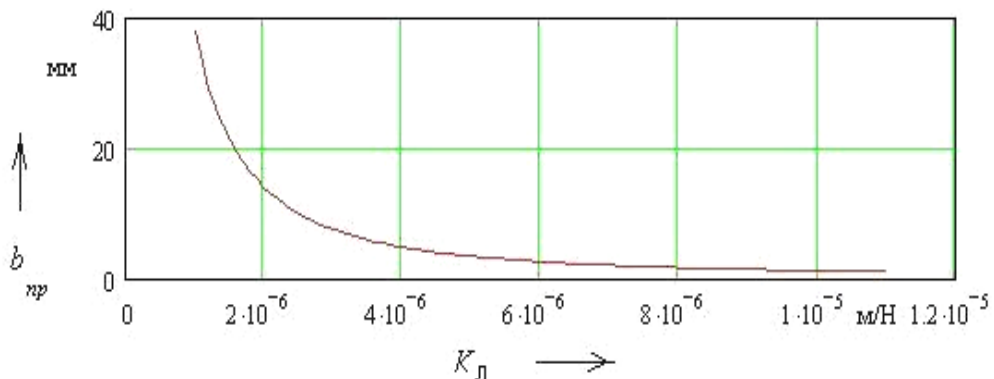
Для рассматриваемой системы передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{W_1(p) + W_2(p)}{1 + W_3(p) \cdot [W_1(p) + W_2(p)]}. \quad (5)$$

Анализ устойчивости динамической системы выполнялся на основе критерия устойчивости Гурвица. Данное условие принимает вид неравенства, которое определяет границу устойчивости

$$\left[ \frac{T_{yc1}}{T_{yc2}^2} + \frac{1}{T_p} (1 + K_p K_l) \right] \cdot [T_p + T_{yc1} (1 + K_p K_l)] - (1 + K_p K_l) > K_p K_{yc}. \quad (6)$$

Расчеты в программе Mathcad, выполненные по зависимости (6), позволили определить предельные значения сечения срезов при обработке нежесткой детали. Результаты расчетов представлены на рис. 7.



фрезерование заготовок из сплава ВТ3-1 инструментом с покрытием (AlSiTi)N

$$K_{yc} = 5,9 \cdot 10^{-8} \text{ м/Н}; T_{yc1} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; T_{yc2} = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; a_l = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Рис. 7 – Предельное сечение среза в зависимости от податливости пера лопатки

Анализ показывает, что снижение жесткости пера лопатки, особенно при консольном креплении, может существенно уменьшить запас устойчивости системы. Для повышения запаса устойчивости можно рекомендовать использование других схем, например, с поддерживающим центром, обеспечивающим более высокую жесткость.

В процессе концевой фрезерования параметрами, влияющими на процесс обработки, являются: скорость резания, сечение среза и износ инструмента.

Область устойчивости при изменении скорости резания  $v_p$  показана на рис. 8. Исследования показывают, что область устойчивости при изменении скорости резания имеет экстремум - минимум. Это подтверждается экспериментальными результатами.

Результаты исследования области устойчивости в зависимости от износа режущего инструмента по задней поверхности  $h_z$  показаны на рис. 9. Видно, что предельная ширина среза при увеличении износа быстро уменьшается, а затем стабилизируется. Рекомендуемый износ инструмента не должен превышать 0,15...0,25 мм.

Результатами расчета области устойчивых режимов фрезерования по выражению (5) для предельной ширины среза удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, погрешность в диапазоне режимов обработки, применяемых в производстве, не превышает 19 %.

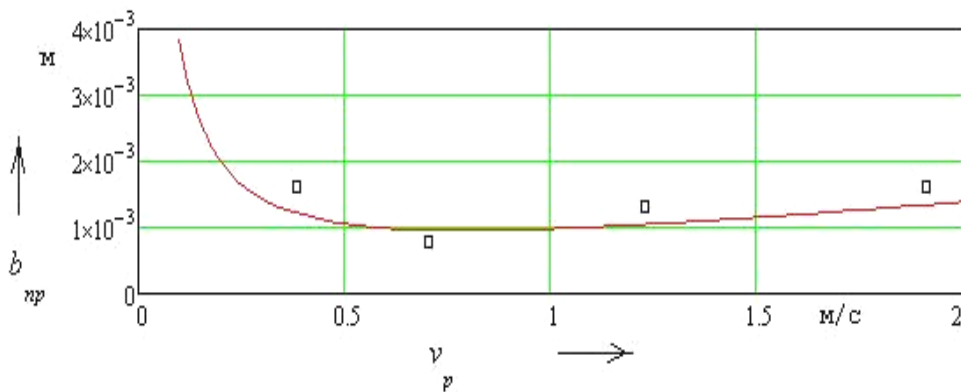


Рис. 8 – Предельная ширина среза в зависимости от скорости резания  $v_p$

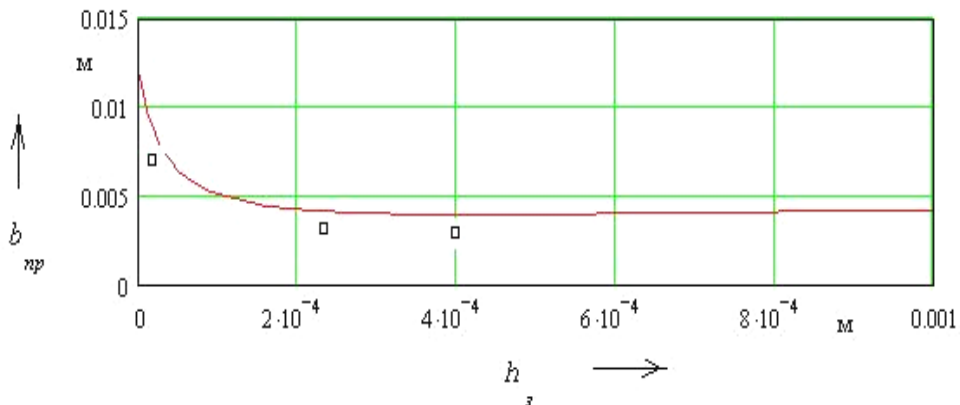


Рис. 9 – Предельная ширина среза в зависимости от износа фрезы по задней поверхности  $h_z$

Параметры  $v_p$  и  $h_z$  входят в коэффициенты передачи и постоянные времени передаточных функций.

Результаты исследований позволили выделить зону, определяющую запас устойчивости в зависимости от режимов обработки при внешнем воздействии от работы по “следу” (рис. 10).

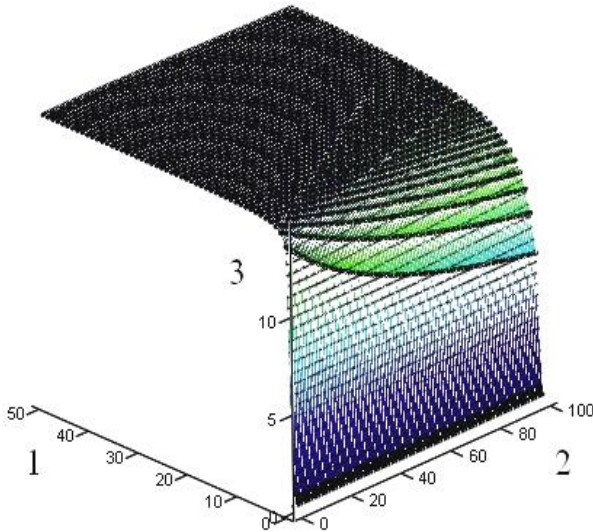


Рис. 10 – Запас устойчивости в зависимости от режимов обработки, где в относительных единицах обозначены: 1 – сечение среза  $a_0$  от 0 до 0,1 мм; 2 – скорость резания  $v_p$  от 0 до 120 м/мин; 3 – запас устойчивости

мерностей влияния режимов фрезерования на износ инструмента и изменения составляющих силы и температуры фрезерования.

Как известно, одним из способов повышения качества и производительности концевого фрезерования является применение износостойких покрытий. В рамках работы выполнялось исследование работоспособности четырех типов нанокompозитных покрытий: TiN/NbN, AlCrN, AlTiN, (AlSiTi)N. Результаты исследования износа по задней поверхности концевых фрез с покрытиями в производственных условиях приведены на рис. 11.

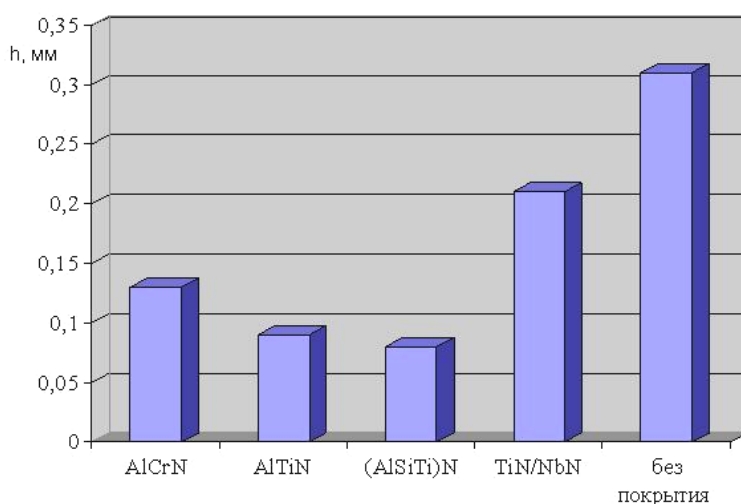


Рис. 11 – Износ фрез с покрытиями (AlCrN, AlTiN, (AlSiTi)N, TiN/NbN) и без покрытия по задней поверхности

Результаты исследований показывают, что при оптимизации концевого фрезерования лопаток по запасу устойчивости необходимо учитывать режимы резания, износ и геометрические параметры инструмента.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса концевого фрезерования, приведена методика экспериментальных исследований, дано описание используемой аппаратуры. Цель экспериментов состояла в подтверждении теоретических положений и установлении закономерностей влияния режимов фрезерования на износ инструмента и изменения составляющих силы и температуры фрезерования.

Наилучшие результаты показали износостойкие покрытия AlTiN и (AlSiTi)N. По сравнению с использованием инструмента без покрытия величина износа понизилась в 3...3,5 раза.

Для получения зависимостей составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и температуры резания  $\theta$  от условий обработки применялся метод многофакторного планирования эксперимента. Для сокращения количества экспериментальных точек был выбран план ДФЭ  $2^{4-1}$ .

личества экспериментальных точек был выбран план ДФЭ  $2^{4-1}$ .

Для моделирования зависимостей, указанных выше, использовались степенные функции вида:

$$\begin{aligned}
 P_z &= C_z \cdot \left(\frac{s_z}{s_{z0}}\right)^{kz_1} \cdot \left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^{kz_2} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{kz_3} \cdot \left(\frac{b}{b_0}\right)^{kz_4} ; \\
 P_y &= C_y \cdot \left(\frac{s_z}{s_{z0}}\right)^{ky_1} \cdot \left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^{ky_2} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{ky_3} \cdot \left(\frac{b}{b_0}\right)^{ky_4} ; \\
 \theta &= C_t \cdot \left(\frac{s_z}{s_{z0}}\right)^{kt_1} \cdot \left(\frac{v_p}{v_{p0}}\right)^{kt_2} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{kt_3} \cdot \left(\frac{b}{b_0}\right)^{kt_4} ,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где  $C_z, C_y, C_t, kz_1, kz_2, kz_3, kz_4, ky_1, ky_2, ky_3, ky_4, kt_1, kt_2, kt_3, kt_4$  – эмпирические коэффициенты;  $s_z$  – подача, мм;  $v_p$  – скорость резания, м/мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $b$  – ширина строки, мм;  $s_{z0}$  – основной уровень подачи, мм;  $v_{p0}$  – основной уровень скорости резания, м/мин;  $t_0$  – основной уровень глубины резания, мм;  $b_0$  – основной уровень ширины строки, мм.

Обобщение полученных результатов исследования в виде коэффициентов регрессионных зависимостей представлено в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты регрессионных зависимостей

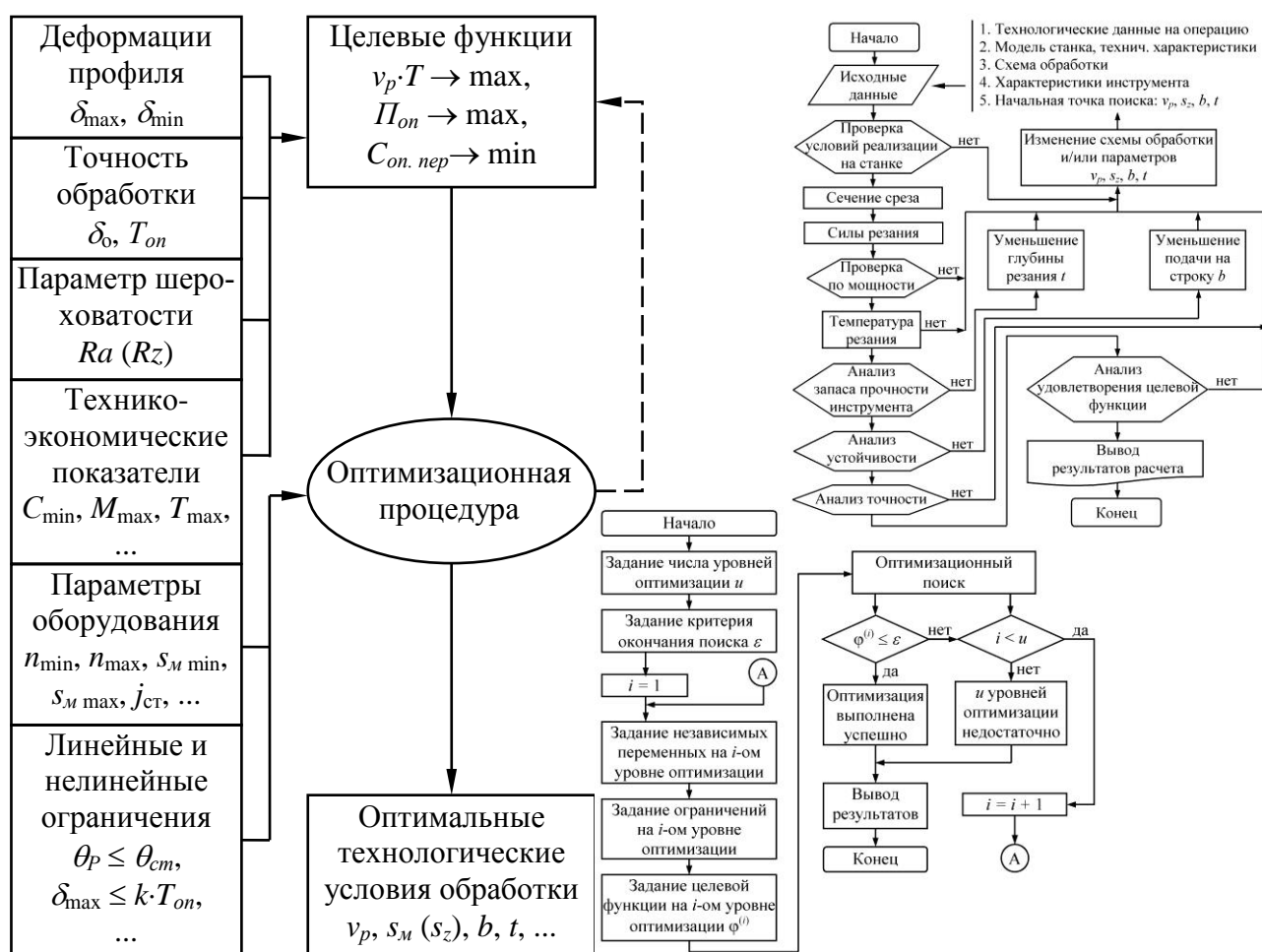
Материал	Схема обработки	Зависимость	$C$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
ОТ4	встречная	$P_z$	23,9	0,69	-0,16	0,67	0,95
		$P_y$	53,5	0,67	-0,18	0,63	0,93
	попутная	$P_z$	24,6	0,63	-0,24	0,76	0,98
		$P_y$	48,9	0,59	-0,27	0,71	0,96
	в/п	$\theta$	471	0,25	0,35	0,12	0,18
ВТ3-1	встречная	$P_z$	33,1	0,73	-0,14	0,58	1,15
		$P_y$	62,6	0,65	-0,22	0,62	1,08
	попутная	$P_z$	32,6	0,67	-0,23	0,75	1,07
		$P_y$	58,0	0,61	-0,28	0,68	1,02
	в/п	$\theta$	537	0,28	0,38	0,13	0,15
ВТ6	встречная	$P_z$	28,7	0,72	-0,15	0,62	1,05
		$P_y$	59,6	0,66	-0,21	0,65	1,01
	попутная	$P_z$	28,5	0,65	-0,24	0,75	1,03
		$P_y$	55,4	0,62	-0,27	0,69	0,98
	в/п	$\theta$	508	0,24	0,34	0,08	0,2
ВТ9	встречная	$P_z$	35,3	0,79	-0,17	0,53	1,08
		$P_y$	67,9	0,73	-0,2	0,67	1,02
	попутная	$P_z$	35,8	0,72	-0,25	0,79	1,12
		$P_y$	61,7	0,65	-0,29	0,74	1,05
	в/п	$\theta$	576	0,33	0,44	0,1	0,19

Сопоставление результатов расчета силы и температуры резания с результатами экспериментов, проведенное для соответствующих точек многофактор-

ного пространства, показало, что при уровне доверительной вероятности 0,95 наибольшая погрешность не превышает 24 %. Удовлетворительное согласование подтверждает адекватность полученных регрессионных моделей и свидетельствует об их достоверности.

**В четвертой главе** приводится предложенная автором методика оптимизации операций концевго фрезерования моноколес и лопаток компрессора ГТД по технико-экономическим показателям и параметрам качества.

Границы подлежащей оптимизации системы и ее математическая модель представлены в предыдущих главах работы. Очевидно, что вид целевой функции может изменяться в зависимости от выбранных критериев оптимальности. Однако, разработанная методика определения оптимальных условий обработки сохранит свою структуру, представленную на рис. 12.



Исходные данные								Результаты расчета		
Обрабатываемая деталь		Режущий инструмент				СОТС	Критерии оптимизации	Режим обработки		Стоимость
Наименование	Материал	Наименование	Материал	Геометрия	Станок			$v_p$ , м/мин	$s_M$ , мм/мин	
Моноколесо	ВТ3-1	Фреза коническая	H10F + (AlSiTi)N	$\alpha = 14^\circ$ , $\gamma = 8^\circ$ , $z = 4$ , $r = 3,5$ мм	Mikron UCP 710	MobilCut 151	$Ra = 2,5$ мкм, $\Pi \rightarrow \max$	97,5	680	107

Рис. 12 – Структура методики определения технологических условий концевго фрезерования лопаток и моноколес

В общем случае выбираемые целевые функции и основные ограничения представлялись в следующем виде:

$$v_p \cdot T = 2,75 \cdot 10^{10} \cdot \frac{\sigma_{\omega}^{1,5} \cdot \left( \frac{\lambda_p}{c\rho_p} \right) \cdot \eta_s \cdot h_3}{\tau_k \cdot \tau_p^{0,5} \cdot s_z^{0,5} \cdot b_k^{0,5} \cdot \omega_{\phi}^{0,5} \cdot K_n} \rightarrow \max; \quad (8)$$

$$P_{on} = \frac{1}{t_{um,k}} \rightarrow \max; \quad (9)$$

$$C_{on.ner} = E \cdot t_m + \frac{(t_{cm} + t_n) \cdot E + C'_u}{T} \cdot k_m \cdot t_m \rightarrow \min; \quad (10)$$

- ограничение по температуре в зоне резания  $\theta_p \leq \theta_{cm}$ ;
- ограничения по прогибу и запасу прочности зуба инструмента  $\eta_{\theta} \geq 1$ ;
- ограничения по устойчивости (5);
- ограничение по деформации профиля (3) и точности обработки.

На первом этапе выполняется максимизация произведения  $v \cdot T$ , которая позволяет определить скорость резания, при которой появляется возможность обеспечить необходимую для выполнения управляющей программы стойкость инструмента. На втором этапе решается вопрос об удовлетворении требований максимальной производительности при обеспечении ограничений, в том числе, по деформациям детали и устойчивости процесса обработки. На третьем этапе анализируются условия обеспечения минимума себестоимости обработки.

Результаты работы внедрены на ПАО «ОДК – Сатурн» при обработке моноколес и лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов, а используются в учебном процессе.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработанная модель взаимодействия инструмента и заготовки при конечном фрезеровании инструментом с радиусной рабочей поверхностью с учетом подачи по криволинейной траектории позволила определить закономерности формирования сечения срезов и длины контакта.

2. Математическая модель для расчета составляющих силы резания позволила применительно к условиям конечного фрезерования деталей ГТД, имеющих малую жесткость, определить деформации компонентов технологической системы в зависимости от схемы закрепления детали.

3. Разработанная модель процесса тепловых процессов для граничных условий 3-го рода и нестационарных условий конечного фрезерования позволила установить, что при расчетах температуры в режущем лезвии достаточно учитывать от 3 до 10 последовательных резов.

4. Разработанная динамическая модель процесса конечного фрезерования, учитывающая деформации в технологической системе, позволила сформулиро-

вать ограничения области режимов фрезерования, обеспечивающих устойчивость обработки. Исследованы особенности поведения технологической системы в части динамики пера лопатки с переменной жесткостью.

5. Исследования динамики концевой фрезерования позволили установить закономерности влияния на устойчивость основных параметров процесса, и определить запас устойчивости системы в случае работы по «следу».

6. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить механические характеристики ряда износостойких покрытий режущего инструмента и установить влияние покрытий на работоспособность концевых фрез, снижение износа 3-3,5 раза, повышение минутной подачи при допустимом износе по задней поверхности 0,2 мм в 2 раза, что позволяет увеличить производительность обработки до 80%.

7. В результате экспериментальных исследований с использованием многофакторного планирования экспериментов получены регрессионные модели, позволяющие определить составляющие силы резания и температуру резания в зависимости от режимов концевой фрезерования для группы титановых сплавов ОТ4; ВТ3-1; ВТ6; ВТ9.

8. Разработанная методика оптимизации обработки лопаток и моноколес ГТД концевыми фрезами позволила определить режимы резания, отвечающие выбранной целевой функции и ограничениям. Отличительной особенностью методики является учет динамики процесса резания.

9. Расчеты, выполненные на основе алгоритма оптимизации технологических условий концевой фрезерования, позволили дать практические рекомендации по концевому фрезерованию моноколес и лопаток компрессора ГТД в машиностроительном производстве.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Волков, Д. И.** Расчет температурного поля в режущем клине при нестационарном тепловом процессе [Текст] / Д. И. Волков, С. М. Кожина // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 4(43). – С. 114-121.

2. **Волков, Д. И.** Фрезерование крыльчаток ГТД монолитными твердосплавными фрезами с износостойкими покрытиями [Текст] / Д. И. Волков, С. М. Кожина // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2018. - №1(44). – С. 62-66.

3. **Волков, Д. И.** Динамическая модель резания нежестких деталей концевыми фрезами [Текст] / Д. И. Волков, С. М. Кожина // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2018. - №4(47). – С. 68-78.

4. **Волков, С. А.** Технологическое и технико-экономическое обеспечение заданных эксплуатационных показателей деталей машин [Текст] / С. А. Волков, С. М. Кожина // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева – №3(42) – 2017. – С. 120-126.