

На правах рукописи

Левитова Ольга Николаевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ  
ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ СИСТЕМ ГТД ПУТЕМ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПРОМЫВОЧНЫХ СРЕД**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2013

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

Научный руководитель:

Семенов Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Белобородов Сергей Михайлович, доктор технических наук, «Научно-производственное объединение «Искра», начальник группы отдела №722.

Галиновский Андрей Леонидович, кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, профессор кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа.

Защита диссертации состоится 15 мая 2013 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального 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 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева».

Автореферат разослан 12 апреля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Конюхов Борис Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность работы*

Усложнение конструкции, расширение областей использования, увеличение ресурса, повышение требований к эксплуатационной надежности газотурбинных двигателей новых поколений поставило задачу высокоэффективной очистки систем в ряд наиболее актуальных. Современный газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложнейшую техническую систему, состоящую из множества подсистем, к чистоте внутренних поверхностей которых предъявляются очень жесткие требования. Наиболее высокие требования предъявляются к чистоте гидравлической, масляной и топливной систем двигателя, так как попадание загрязнений в узлы и агрегаты ГТД может привести к негативным последствиям: интенсивному изнашиванию, закупорке каналов малого сечения, увеличению сил трения, заклиниванию плунжерных пар, возникновению кавитационных явлений, окислению рабочих сред и т.д.

Тщательная очистка полостей систем от производственных и эксплуатационных загрязнений повышает срок их безотказной работы, улучшает технические характеристики и эксплуатационные свойства газотурбинных двигателей, сокращает расходы на обслуживание и ремонт, что дает большой экономический эффект. Современный уровень и темпы технического развития авиации выдвигают на первый план задачу обеспечения высокой надежности авиационных двигателей. Обеспечение необходимого уровня надежности возможно только в том случае, если на всех стадиях производства и ремонта ГТД осуществляется качественная очистка деталей и узлов его систем. Поэтому задача обеспечения высокой эффективности очистки внутренних рабочих полостей является важной и актуальной.

**Цель работы** – повышение эффективности очистки протяженных внутренних полостей систем ГТД путем увеличения нестационарности потока моющих сред.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**.

- 1 Изучение основных видов загрязнителей каналов систем ГТД.
- 2 Анализ характеристик внутренних поверхностей систем ГТД.
- 3 Исследование закономерностей течения потока жидкости во внутренних полостях деталей и узлов систем ГТД.
- 4 Создание математической модели механизма удаления загрязнений из внутренних полостей, учитывающей характеристики частиц загрязнений, конфигурацию, шероховатость очищаемых поверхностей и режим движения потока моющей жидкости.
- 5 Разработка комплексного критерия и методики оценки очистной технологичности трубопроводных систем на этапе проектирования изделий.

6 Разработка алгоритма и методики для автоматизированной очистки каналов систем ГТД пульсирующим потоком моющей жидкости.

7 Подтверждение достоверности математической модели и эффективности предлагаемых мероприятий.

#### ***Основные положения, выносимые на защиту***

1 Математическая модель удаления загрязнений из внутренних полостей деталей и узлов систем ГТД.

2 Критерий и алгоритм оценки технологичности очистки деталей и узлов систем ГТД на этапе проектирования.

3 Алгоритм для автоматизированного проектирования технологии очистки внутренних полостей систем ГТД.

#### ***Общая методика исследований***

При выполнении работы использовались известные закономерности из областей физики, гидравлики, гидрогазодинамики, технологии производства ГТД. Расчетно-теоретические исследования проводились с использованием сертифицированных программных комплексов «ANSYS CFX 14», «NX 7.5».

***Научная новизна*** заключается в разработке:

- математических моделей процесса удаления загрязнений из внутренних полостей, учитывающей характеристики частиц загрязнений, конфигурацию и шероховатость очищаемых поверхностей, режимы движения потока моющей жидкости;

- критерия и алгоритма оценки очистной технологичности внутренних поверхностей на этапе проектирования изделий;

- алгоритма для автоматизированного назначения условий и режимов очистки, обеспечивающего заданный класс чистоты систем ГТД.

#### ***Практическая ценность и реализация результатов работы***

1 Разработаны мероприятия по повышению эффективности и автоматизации процесса очистки каналов систем ГТД нестационарным потоком моющей жидкости.

2 Разработана методика оценки очистной технологичности внутренних поверхностей деталей и узлов систем ГТД на этапе проектирования.

3. Разработана методика для автоматизированного проектирования технологических процессов очистки внутренних полостей систем ГТД.

#### ***Апробация работы***

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международная молодежная научная конференция «XXXVI Гагаринские чтения», г. Москва, РГТУ «МАТИ», 2010 г.; международный научно-технический семинар «Современные технологии сборки», г. Москва, МГТУ «МАМИ», 2011 г., международная научно-техническая кон-

ференция «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (ТМ-2012), г. Рыбинск, РГАТУ, 2012 г.

### ***Публикации***

По теме диссертации опубликовано 8 статей, из них две – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных работ.

### ***Структура и объем диссертации***

Работа изложена на 197 страницах, иллюстрирована 55 рисунками и содержит 46 таблиц. Диссертация состоит из введения и шести глав. Список использованных источников содержит 111 наименований, 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** описывается современное состояние в области обеспечения промышленной чистоты внутренних полостей систем ГТД, обоснована важность проблемы, решаемой в диссертации.

***В первой главе*** рассмотрена взаимосвязь промышленной чистоты функциональных систем и надежности ГТД. Достижение эксплуатационной надежности и безопасности возможно только в том случае, если на всех стадиях производственного цикла ГТД обеспечивается высокий уровень чистоты внутренних поверхностей. Проанализированы типичные отказы двигателей, связанные с основными видами и характеристиками загрязнений (природа, дисперсный состав и массовая концентрация).

В результате анализа существующих способов очистки деталей и узлов систем ГТД выявлено, что основным методом активации загрязнений в застойных зонах систем, обеспечивающим их гарантированное удаление, является создание циркулирующей нестационарности рабочих сред, за счет чего можно существенно повысить эффективность очистки каналов любой протяженности и конфигурации. Качество и продолжительность процесса очистки зависят от характеристик частиц загрязнений. В результате анализа проб, полученных в процессе очистки узлов систем ГТД, выявлено, что для снижения продолжительности и увеличения эффективности очистки каналов систем ГТД необходимо повысить интенсивность удаления частиц загрязнений с размерами менее 100 мкм.

Выполнен обзор литературных источников по рассматриваемой проблеме. Работы, посвященные очистке каналов циркулирующим потоком моющей жидкости, можно условно разделить на группы: исследования процесса очистки стационарным потоком жидкости (Т.М Башта, К.А. Никитин, С.В. Чирков); изучение основных закономерностей очистки металлических поверхностей (П.Н. Белянин, В.М. Данилов); анализ методов повышения эффективности очистки циркулирующим потоком моющей жидкости (П.Н. Белянин,

В.М. Данилов, Р.Г. Тимиркеев, В.М. Сапожников, А.Н. Свиридов); использование пульсирующих потоков моющей жидкости для очистки авиационных гидроагрегатов (В.М. Санчугов, В.М. Решетов); организационно-технические вопросы обеспечения промышленной чистоты (П.Н. Белянин, В.М. Данилов, Р.Г. Тимиркеев, В.М. Сапожников). В большинстве исследований рассматриваются общие закономерности процессов очистки, и, поэтому, их результаты требуют дальнейшего развития для безусловного применения при производстве ГТД.

Сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** исследованы конструктивные особенности внутренних полостей деталей и узлов функциональных систем ГТД и характер их влияния на течение рабочих и очистных сред.

Системы ГТД имеют большую протяженность и сложную пространственную конфигурацию, а внутренние поверхности каналов, в зависимости от способов их изготовления и вида конструкционных материалов, могут иметь отклонения от правильной геометрической формы и различную шероховатость. Выявлено, что наиболее неблагоприятными видами гидравлических сопротивлений являются: резкие прямые или тупые повороты с застойными областями; резкие сужения и расширения; прямые и тупые разветвления; стыки в резьбовых, паяных и сварных соединениях. Большое влияние на параметры течения потока жидкости также оказывает шероховатость поверхностей в диапазоне  $Re$  3,2 - 12,5.

Известно, что режим течения жидкости определяется числом Рейнольдса  $Re$ , которое для каналов одинакового диаметра зависит от скорости моющей жидкости и ее температуры. При переходе от ламинарного режима течения к турбулентному увеличиваются касательные напряжения на стенках канала, уменьшается толщина пограничного слоя, и возрастает скорость в пристеночных слоях жидкости, что способствует более интенсивному воздействию на частицы загрязнений со стороны потока жидкости (рисунок 1).

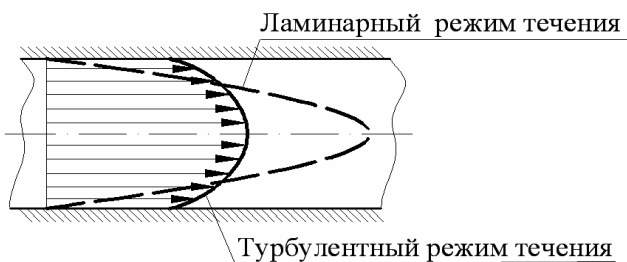


Рисунок 1 – Профили скоростей потока при турбулентном и ламинарном течениях

Турбулентный режим течения в каналах систем формируется при числе Рейнольдса  $1 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^5$  и скорости потока жидкости от 5 м/с. Однако, увеличение числа Рейнольдса за счет повышения скорости потока жидкости нецелесообразно, так как требуется использование мощных насосных

станций, что существенно увеличивает затраты электроэнергии. Для интенсификации механического воздействия потока жидкости на загрязнения предлага-

ется повышать турбулентность путем использования растворов с повышенной температурой (60 – 80 °С). При скорости потока жидкости от 5 м/с и температуре выше 60 °С в каналах систем диаметром до 50 мм толщина пограничного слоя при очистке маслами может достигать 203...820 мкм, ЛВЖ – 76...94 мкм, а водными растворами – 16...50 мкм, что является основанием для преимущественного назначения водных растворов в качестве основных моющих сред.

**В третьей главе** рассматривается процесс механического воздействия потока моющих сред на загрязнения, которое является одним из основных условий, определяющих эффективность очистки. Этот процесс можно разделить на последовательно происходящие этапы: отрыв частиц загрязнителя от поверхности и их транспортировку из зоны очистки до фильтрующих устройств.

Процесс отрыва загрязнений потоком моющей жидкости является основной составляющей всего процесса очистки. На частицу, лежащую на внутренней поверхности канала, со стороны потока жидкости, движущейся со скоростью  $u$ , действуют силы: тяжести  $G$ , адгезии  $F_{ад}$ , трения  $F_{тр}$ , лобового сопротивления  $W_x$ , подъема  $W_y$  и инерции  $F_u$ . (рисунок 2).

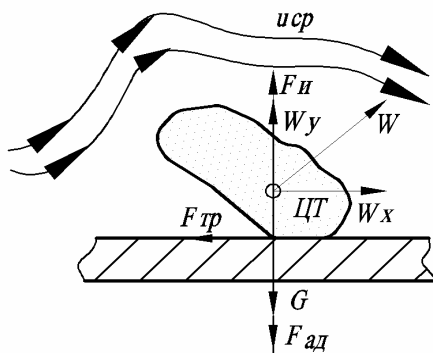


Рисунок 2 – Схема воздействия потока на частицу, лежащую на поверхности

Отрыв частицы от поверхности возможен, если сумма сил гидравлического воздействия на нее жидкости в направлении потока превысит силы трения и удержания на поверхности

$$W_x > F_{тр}. \quad (1)$$

$$W_y + F_u > F_{ад} + G. \quad (2)$$

Сила лобового сопротивления  $W_x$ , смещающая частицу относительно

поверхности контакта, определяется выражением

$$W_x = \frac{1}{8} c_x \rho_{ж} u^2 \pi D_c^2, \quad (3)$$

где  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$D_c$  – диаметр частицы загрязнения, м.

Подъемную силу  $W_y$ , возникающую вследствие несимметричности обтекания загрязнений потоком жидкости, в результате чего давление жидкости под частицами превышает давление над ними (рисунок 3), можно выразить

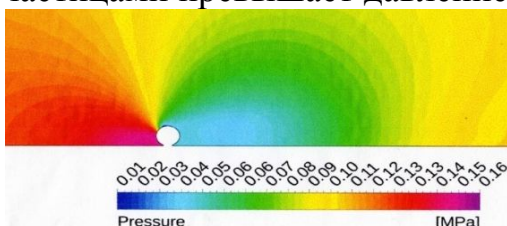


Рисунок 3 – Распределение давления вокруг частицы

$$W_y = (P_n - P_g) \frac{\pi D_c^2}{4} = \frac{1}{8} \rho_{ж} \left( \left( \frac{D_k}{D_c} \right) u \right)^2 \pi D_c^2, \quad (4)$$

где  $P_n$  – давление под частицей, Па;

$P_g$  – давление над частицей, Па.;

$D_k$  – диаметр очищаемого канала, м;

$\delta$  – толщина пограничного слоя, м.

Сила инерции возникает при пульсациях потока жидкости и в рассматриваемом случае может не учитываться.

При транспортировке в потоке жидкости частица может двигаться в двух направлениях: осевом со скоростью  $u_x$  и радиальном со скоростью  $u_{oc}$ . На частицу, находящуюся только во взвешенном состоянии, действуют следующие силы: тяжести  $G$ , сопротивления  $W_{сопр}$  и пульсации  $W_{пульс}$  (рисунок 4).

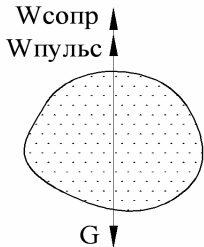


Рисунок 4 – Схема воздействия потока на частицу в потоке

Условием нахождения частицы во взвешенном состоянии является равенство

$$W_{сопр} + W_{пульс} = G. \quad (5)$$

Оседанию частиц на поверхность из основного потока жидкости препятствует сила сопротивления  $W_{сопр}$

$$W_{сопр} = \frac{1}{8} c_{сопр} \rho_{ж} u_{oc}^2 \pi D_c^2, \quad (6)$$

где  $c_{сопр}$  – коэффициент сопротивления движению.

Сила пульсации  $W_{пульс}$  зависит от радиальной скорости потока жидкости  $u_y$  и, следовательно, от режима ее течения. При скорости потока 3-7 м/с радиальная составляющая скорости в каналах систем ГТД имеет значение 0,2-0,8 м/с.

Для определения характера перемещения частиц при транспортировке предложен критерий удаления частиц, физический смысл которого заключается в сравнении времени транспортировки  $t_{mp}$  с временем осаждения  $t_{oc}$

$$K_{y\partial} = \frac{t_{mp}}{t_{oc}} = 2 \frac{u_y \cdot L_k}{u_x D_k}, \quad (7)$$

где  $L_k$  – длина очищаемого канала, м.

При  $K_{y\partial} \leq 1$  частицы движутся в основном потоке и будут полностью вынесены из канала, при  $K_{y\partial} > 1$  частицы оседают обратно на поверхность и вероятность их выноса снижается.

Геометрическая форма частиц загрязнений влияет на процесс их транспортировки. Скорость осаждения из потока жидкости для частиц неправильной формы меньше, чем для сферических частиц сопоставимых размеров. Размер частиц загрязнений, в первую очередь, влияет на силу их адгезии к очищаемой поверхности.

Влияние геометрических характеристик частиц загрязнений на особенности протекания процессов их отрыва и транспортировки предлагается учитывать с помощью критерия формы частиц  $K_\phi$

$$K_\phi = \frac{L_{max}}{L_{min}}, \quad (8)$$

где  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  – максимальный и минимальный размеры частицы, м, который косвенно характеризует силы адгезии частиц к поверхности.



Для частиц с размером меньше 100 мкм сила адгезии оказывает основное влияние на их удержание на поверхности, поэтому при расчетах силой тяжести можно пренебречь, а силу адгезии частиц вытянутой формы (с  $K_\phi > 2$ ) необходимо учитывать с помощью коэффициента адгезии  $K_{ad}$

$$K_{ad} = \frac{F_{ad\_c\phi}}{F_{ad\_выт}}, \quad (9)$$

где  $F_{ad\_c}$ ,  $F_{ad\_выт}$  – силы адгезии для сферической и вытянутой частиц, Н.

В зависимости от глубины погружения в пограничный слой частицы загрязнений предлагается разделить на две размерные группы: частицы с  $D_q < 50$  мкм, находящиеся в толще пограничного слоя жидкости (группа 1), и частицы с  $50 < D_q < 100$  мкм, выступающие из него (группа 2), поскольку на них будут по-разному воздействовать силы жидкости.

Средние скорости  $u_{cp\_x}$ , необходимые для перемещения частиц этих групп под действием лобовой силы  $W_x$ , можно определить

$$\begin{array}{ll} D_q < 50 \text{ мкм} & D_q > 50 \text{ мкм} \\ u_{cp\_x\_1} > \sqrt{\frac{8f_{mp}kK_{ad}}{\rho_{жс}c_x\pi D_q}} \left(\frac{2\delta}{D_q}\right)^{1/7}; & u_{cp\_x\_2} > \sqrt{\frac{8f_{mp}kK_{ad}}{\rho_{жс}c_x\pi D_q}}, \end{array} \quad (10)$$

где  $f_{mp}$  – коэффициент трения.

$k$  – опытный коэффициент адгезии, Н/м.

Графики полученных зависимостей представлены на рисунке 5.

Расчет показывает, что силы лобового сопротивления частиц группы 1 и частиц группы 2 с  $K_\phi > 4$ , движущихся в потоке со скоростью 3–5 м/с, недостаточно для перемещения в продольном направлении. Для обеспечения отрыва и успешной транспортировки на них должна воздействовать достаточная подъемная сила со стороны потока жидкости, определяемая скоростями

$$\begin{array}{ll} D_q < 50 \text{ мкм} & D_q > 50 \text{ мкм} \\ u_{cp\_y\_1} > \sqrt{\frac{8kK_{ad}}{\pi D_q \rho_{жс}}} \left(1 - \frac{D_q^2}{D_\kappa^2}\right) \left(\frac{2\delta}{D_q}\right)^{1/7}; & u_{cp\_y\_1} > \sqrt{\frac{8kK_{ad}}{\pi D_q \rho_{жс}}} \left(1 - \frac{D_q^2}{D_\kappa^2}\right). \end{array} \quad (11)$$

Графики скоростей, необходимых для перемещения частиц с  $D_q < 50$  мкм в основной поток жидкости под действием силы  $W_y$ , представлены на рисунке 6.

Подъемной силы потока, движущегося со скоростью 3–5 м/с, недостаточно для перемещения в поперечном направлении частиц группы 1 и частиц группы 2 с  $K_\phi > 4$ . Наложение колебаний на поток жидкости позволяет повысить разность давлений вокруг частицы и, соответственно, увеличить подъемную силу.

В результате исследования, проведенного при помощи программного комплекса ANSYS CFX 14, выявлено, что для разрушения циркуляционных зон в гидравлических сопротивлениях и отрыва частиц загрязнений с  $D_q < 50$  мкм от поверхности на поток жидкости достаточно накладывать колебания в диапа-

зоне частот от 2 до 4 Гц. Характер распространения колебаний по длине очищаемого канала зависит от его конфигурации и длины.

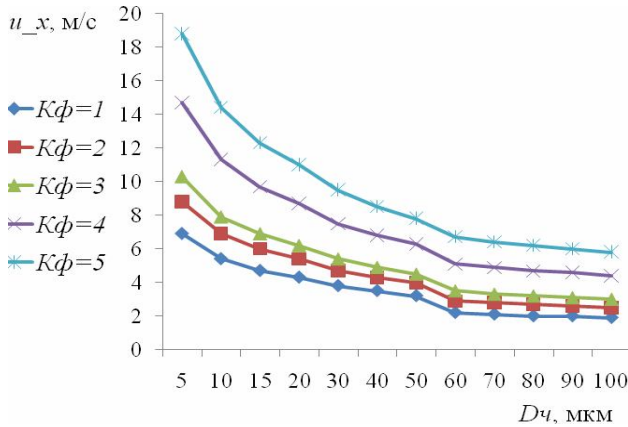


Рисунок 5 – Скорость, необходимая для смещения частиц под действием лобовой силы водного потока (T=60<sup>0</sup>C)

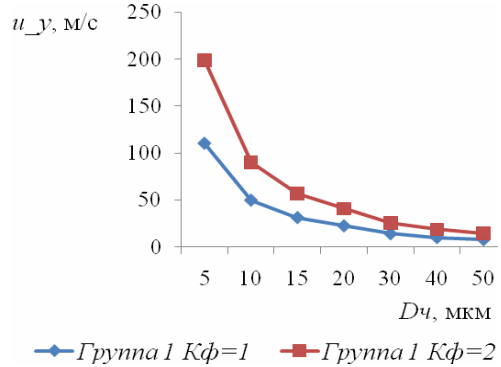


Рисунок 6 – Скорость, необходимая для отрыва частиц группы 1 под действием подъемной силы водного потока (T=60<sup>0</sup>C)

Возникающая в нежестких трубопроводах при наложении колебаний сила инерции, по величине сопоставимая с силой адгезии, также способствует отрыву частиц от стенок.

Скорость осаждения  $u_{oc}$  при транспортировке частиц

$$u_{oc} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} \frac{\rho_{ч}}{\rho_{ж}} D_{ч} g - c_{пульс} u_y^2}{c_{сопр}}} \quad (12)$$

где  $\rho_{ч}$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_{сопр}$  – коэффициент пульсаций;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

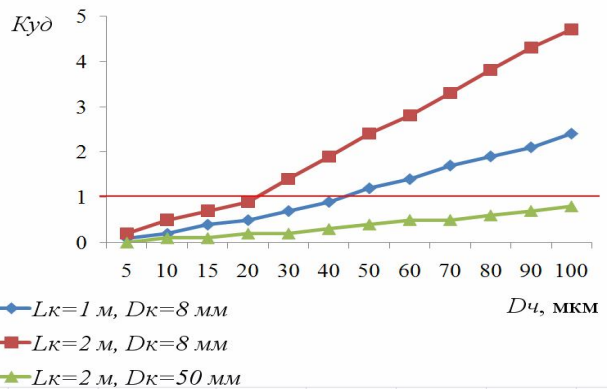


Рисунок 7 – График зависимости  $K_{yδ}$  от размера частиц при  $u=5$  м/с (7)

Зависимость критерия удаления от размеров частиц загрязнений представлена на рисунке 7.

Из представленных данных следует, что частицы группы 1 успешно транспортируются потоком жидкости. Для частиц 2 группы критерий удаления не требуется рассчитывать, так как они перемещаются вблизи поверхности. Если коэффициент удаления для частиц группы 1 больше единицы, то необходимо скорректировать время очистки или производить комбинированную очистку переменным нестационарным и стационарным потоками жидкости.

**Четвертая глава** посвящена отработке конструкции каналов функциональных систем ГТД на очистную технологичность, что обусловлено необходимостью повышения качества и снижения затрат на очистку. Для сравнения различных вариантов конструкции на этапе проектирования с точки зрения эффективности их очистки разработан комплексный критерий очистной техноло-

гичности внутренних поверхностей, который можно представить совокупностью следующих частных показателей:

– критерий влияния шероховатости поверхности  $K_{ш}$

$$K_{ш} = \frac{C_{Ra1,6}}{\sum_{i=1}^{n_{Ra}} C_{Raфакт}^n / n_{Ra}}, \quad (13)$$

где  $C_{Ra1,6}$  – коэффициент сопротивления поверхности канала с шероховатостью  $Ra$  1,6 мкм при заданном числе  $Re$ ;

$C_{Ra факт}^n$  – коэффициент сопротивления участка поверхности канала с шероховатостью, отличной от  $Ra$  1,6 мкм;

$n_{Ra}$  – число участков канала с шероховатостью, отличной от  $Ra$  1,6 мкм;

– критерий влияния местных гидравлических сопротивлений  $K_{zc}$

$$K_{zc} = \frac{C_{гладк}}{\sum_{i=1}^{n_{сопр}} C_{сопр\_факт}^n / n_{сопр}}, \quad (14)$$

где  $C_{гладк}$  – коэффициент сопротивления гладкого прямолинейного канала;

$C_{сопр\_факт}^n$  – коэффициент участка с местным сопротивлением,

$n_{сопр}$  – число участков с гидравлическими сопротивлениями;

– критерий конструктивной сложности  $K_{кc}$

$$K_{кc} = \frac{l}{l + n_{сопр}}; \quad (15)$$

– критерий взаимовлияния гидравлических сопротивлений  $K_{вв}$

$$K_{вв} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{сопр}} C_c}{n_{сопр}} \quad (16)$$

где  $C_c$  – коэффициент учета взаимного влияния сопротивлений.

Комплексный критерий очистной технологичности каналов  $K_T$ , отражающий производственные требования к их конструкции, имеет вид

$$K_T = K_{ш} \cdot K_{гc} \cdot K_{кc} \cdot K_{вв} = \prod_{i=1}^k K_i. \quad (17)$$

Преимуществами комплексного критерия технологичности очистки являются: узкий диапазон возможных значений – от 0 до 1, что позволяет наглядно оценивать на технологичность любые конструкции каналов с позиции эффективности обеспечения промышленной чистоты; высокая чувствительность к использованию любых решений, которые ухудшают условия очистки и снижают ее эффективность.

**В пятой главе** приведен комплекс мероприятий по повышению эффективности очистки систем ГТД, которые заключаются в исключении попадания загрязнений во внутренние полости при испытаниях, контроле, сборке, очистке, хранении и транспортировке деталей и узлов, тщательном контроле чистоты поверхностей на всех этапах производства, рациональном выборе технологиче-

ских моющих сред, автоматизации процесса очистки, разработке методики выбора параметров процесса очистки в зависимости от характеристик очищаемой поверхности и параметров частиц загрязнений.

Для создания нестационарности потока разработана схема генератора колебаний жидкости дискового типа с гидро- или пневмоприводом (рисунок 8) и схема установки для автоматизированной очистки систем ГТД.

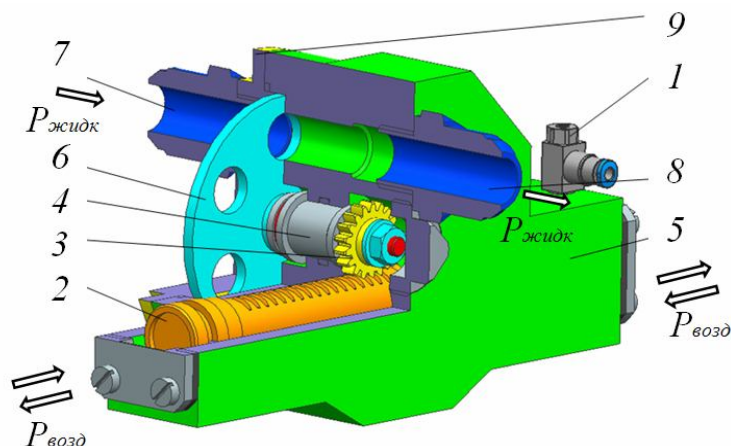


Рисунок 8 – Конструктивная схема гидромеханического генератора колебаний: 1 – дроссель; 2 – рейка-шток; 3 – шестерня; 4 – вал; 5 – корпус; 6 – перфорированный диск; 7,8 – штуцеры подвода и отвода жидкости; 9 – крышка

На основе проведенных исследований разработан алгоритм автоматизированного назначения параметров процесса очистки систем ГТД (рисунок 9).

**В шестой главе** на базе исследований, проведенных в главах 2-4, разработаны методики технологической обработки конструкции каналов функциональных систем ГТД на технологичность на этапе проектирования изделий и выбора параметров процесса очистки деталей и узлов каналов систем ГТД.

Для проверки адекватности разработанной математической модели был выполнен проверочный расчет режимов течения потока жидкости в канале подвода масла опоры турбины двигателя АЛ-55ИИ, результаты которого сопоставлены с результатами расчетов, проведенных в ANSYS CFX 14. Относительная погрешность расчета составляет 15-25%, что связано с большим количеством факторов, влияющих на процесс движения потока жидкости в канале. Это позволяет охарактеризовать предложенную математическую модель и методики как адекватные и подходящие для определения технологичности очистки и расчета ее режимов при проектировании и производстве деталей и узлов систем ГТД.

Произведен анализ экономического эффекта от применения разработанной методики очистки, который наблюдается за счет сокращения количества остановов двигателя при испытаниях по причине обнаружения металлических частиц в рабочих жидкостях.

При изменении сечения канала скорость потока жидкости будет изменяться по закону

$$u(t) = A + A \cos(2\pi f_{\partial} n t), \quad (18)$$

где  $A$  – амплитуда, м/с;  
 $f_{\partial}$  – частота вращения, Гц.  
 $n$  – количество проходных отверстий в диске генератора;

$t$  – время, с.

Генератор позволяет создавать колебания потока жидкости до 5 Гц.

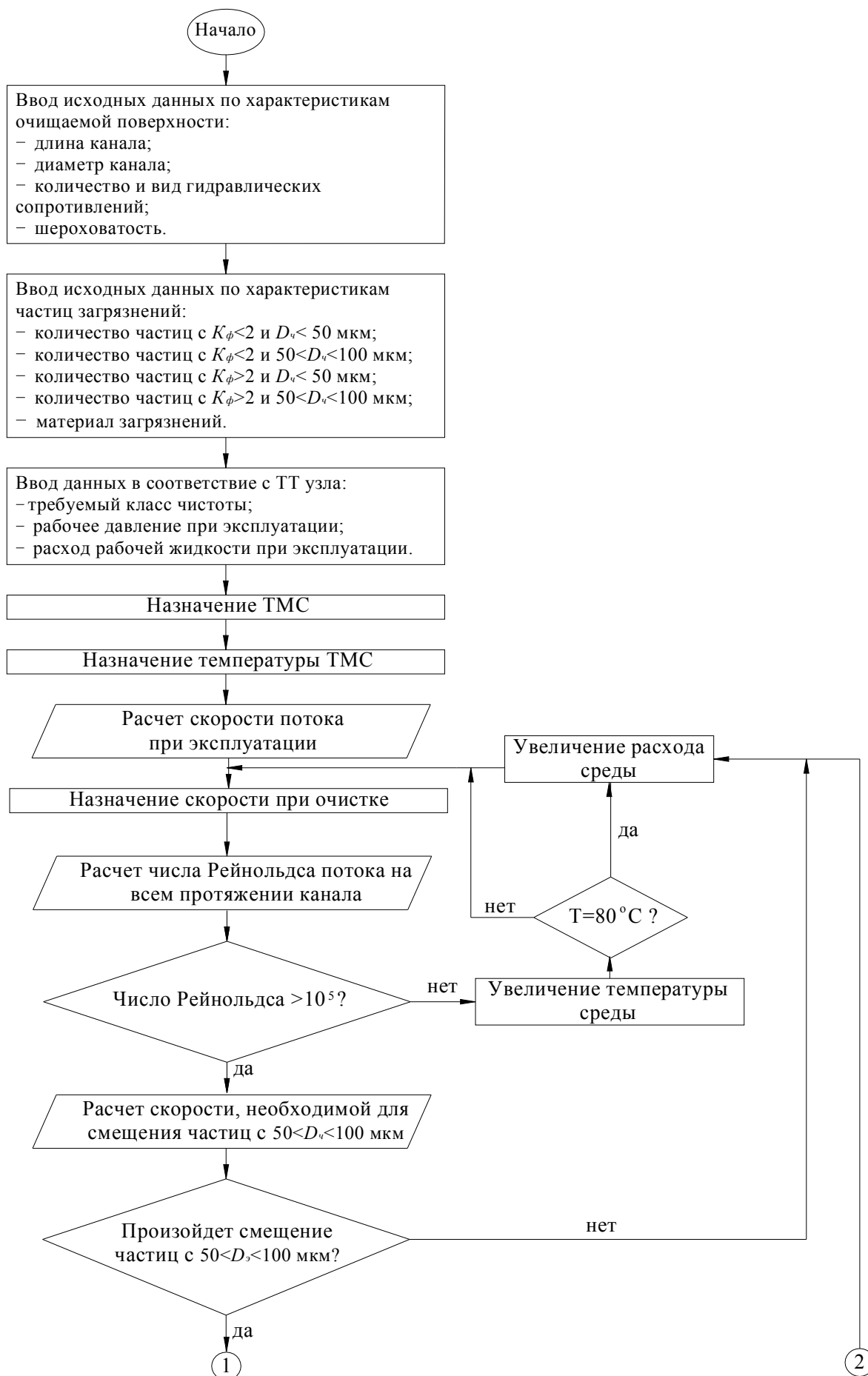


Рисунок 9 – Алгоритм проектирования технологического процесса очистки

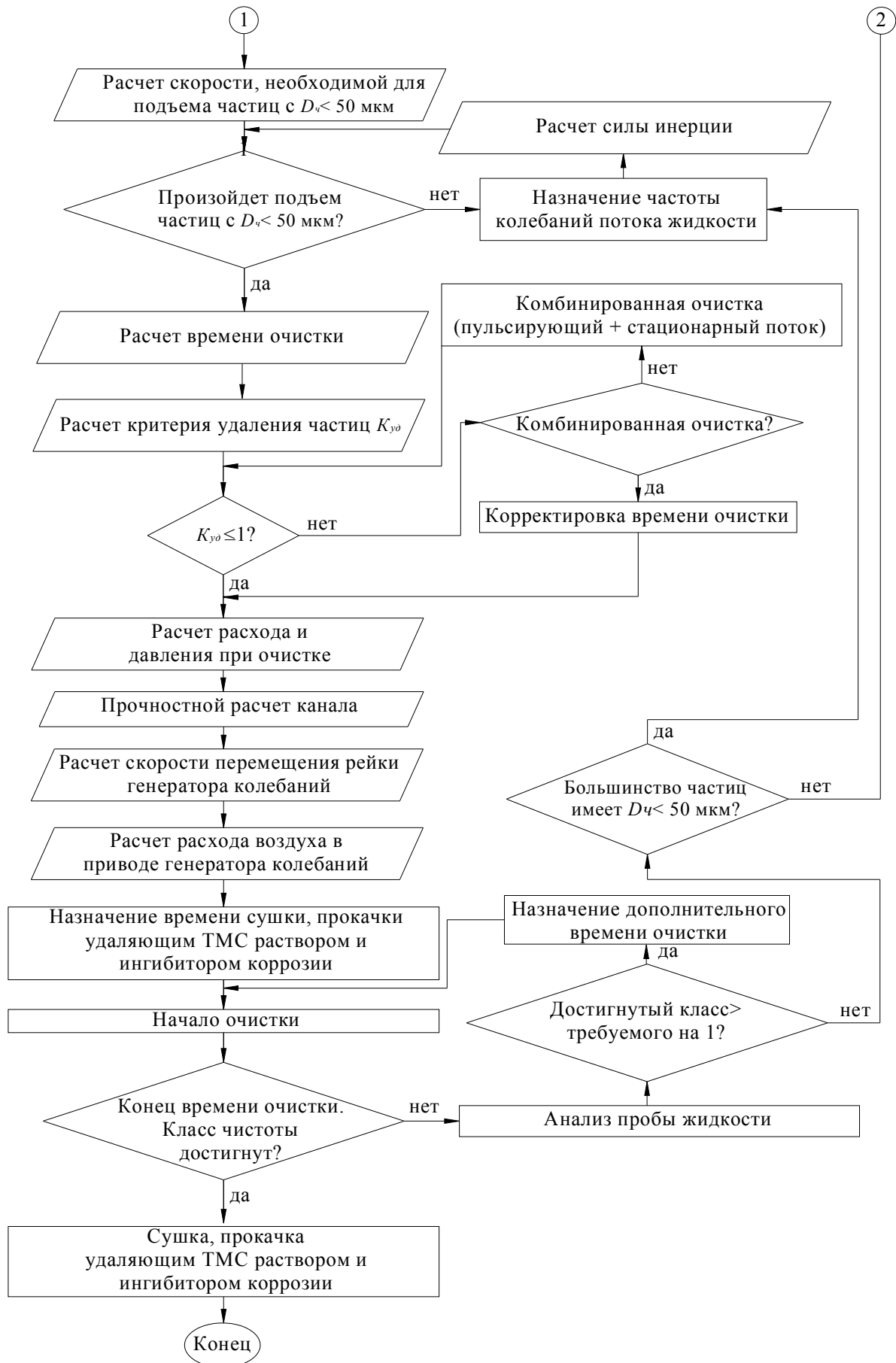


Рисунок 9 – Алгоритм проектирования технологического процесса очистки

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 В результате анализа технологических процессов очистки внутренних полостей узлов систем ГТД выявлено, что наиболее сложно удаляются частицы загрязнений с размерами менее 100 мкм и находящиеся в застойных областях.

2 Очистку каналов ГТД целесообразно производить водными растворами при температуре 60 – 80 °С и скорости потока жидкости 3 – 5 м/с, что приводит к формированию турбулентного режима течения.

3 Разработанная математическая модель процесса отрыва и транспортировки частиц загрязнений в каналах учитывает характеристики частиц загрязнений, конфигурацию и шероховатость очищаемых поверхностей, а также режим движения потока моющей жидкости.

4 Разработаны комплексный критерий оценки очистной технологичности внутренних поверхностей деталей и узлов систем ГТД и методика его определения, которые позволяют на этапе проектирования учитывать влияние конфигурации полостей и шероховатости очищаемых поверхностей на эффективность очистки.

5 Алгоритм и методика для автоматизированного проектирования технологического процесса очистки циркулирующим потоком моющей жидкости позволяют повысить эффективность удаления загрязнений за счет снижения трудоемкости проектирования технологических процессов и очистки, а также назначения рациональных режимов движения моющих сред.

***Основные положения диссертации отражены в 8 опубликованных работах, из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1 **Левитова, О.Н.** Теоретическое исследование законов движения рабочих сред для повышения эффективности очистки систем функционирования газотурбинных двигателей / О.Н. Левитова, А.Н. Семенов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТУ, 2011. – №2(21). – С. 60 – 67.

2 **Левитова, О.Н.** Повышение эффективности очистки каналов систем ГТД на основе моделирования условий удаления технологических загрязнений / О.Н. Левитова, А.Н. Семенов // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – Рыбинск: РГАТУ, 2012. – №2(23). – С. 119 – 126.

### ***В других изданиях***

3 **Левитова, О.Н.** Повышение эффективности очистки внутренних полостей агрегатов и систем ГТД / О.Н. Левитова // XXXVI Гагаринские чтения. Научные труды Международной научной конференции в 8 томах. – М.: МАТИ, 2010. – Т. 2., С. 172–174.

4 **Левитова, О.Н.** Анализ методов гидродинамической очистки внутренних полостей деталей двигателей / О.Н. Левитова // XVIII Туполевские чтения.

Международная молодежная научная конференция, 26-28 мая 2010 года: Материалы конференции.: Казань, 2010. – Т. 3., С. 205 – 207.

5 **Левитова, О.Н.** Анализ эффективности применения различных элементов гидросистем для создания неустановившегося потока при очистке внутренних полостей агрегатов и систем / О.Н. Левитова // IX Международная научно-техническая конференция «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства»: Материалы конференции.: Ростов-на-Дону, 2010. – С. 721-724.

6 **Левитова, О.Н.** Моделирование гидродинамической нестационарности рабочей среды во внутренних полостях деталей и узлов ГТД / О.Н. Левитова // XXXVII Гагаринские чтения. Научные труды Международной научной конференции в 8 томах. – М.: МАТИ, 2011. – Т. 2, С. 10-13.

7 **Семенов, А.Н.** Моделирование гидродинамической нестационарности рабочей среды во внутренних полостях деталей и узлов ГТД / А.Н. Семенов, О.Н. Левитова// Материалы международного научно-технического семинара современные технологии сборки 20-21 октября 2011 года – М.:МАМИ, 2011. – С. 71-80.

8 **Левитова, О.Н.** Алгоритм проектирования технологического процесса очистки каналов систем ГТД / О.Н. Левитова// Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» в 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ, 2012. – Ч. 1, С. 88 – 92.

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать 12.04.2013.

Формат 60x84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100. Заказ 140.

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

Адрес организации: 152934. г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53.

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