

На правах рукописи

Осипович Дарья Андреевна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ СБОРКИ СОПЛОВЫХ  
АППАРАТОВ ТУРБИНЫ ГТД НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЛОПАТОК  
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Специальность **05.02.08** – Технология машиностроения

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

Рыбинск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Ярушин Станислав Геннадьевич**

Официальные оппоненты: **Бочкарев Петр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина»

**Польский Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Защита диссертации состоится «24» сентября 2019 г. в 12.00 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 «23» июля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Надеждин Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования:** Развитие авиационной промышленности направлено не только на разработку и внедрение принципиально новых конструкторских решений, но и имеет тенденцию к росту объемов производства двигателей и техники в целом, определяемую потребностями растущих пассажиро- и грузо- потоков. Требуется координация между наукой и промышленностью с заменой устаревшей производственно-технологической базы. Планируемый рост объема и номенклатуры изготавливаемых двигателей на базе ПС-90А и ПД-14 невозможно выполнить без введения комплексной автоматизации технологических процессов.

При этом окончательная сборка газотурбинных двигателей (ГТД) и их отдельных узлов занимает до 40-50 % общей трудоемкости изготовления изделия и характеризуется рядом проблем, таких как плохая повторяемость результатов сборки, сложность обеспечения требований к качеству и необъективность оценки его достижения, что в совокупности определяет значительную актуальность автоматизации этой стадии.

Существующий уровень производственно-технологических возможностей позволяет обеспечивать достижение требуемой точности одного из ключевых параметров ступени турбины ГТД – площади проходного (минимального) сечения соплового аппарата методом полной взаимозаменяемости не более чем в 30% случаев, в связи с чем возникает необходимость принятия решений о корректировках и доработках комплекта лопаток в узле, на основании данных об их фактической геометрии. Но для проведения и обработки результатов контроля лопаток и сопловых аппаратов в сборе используются трудоемкие устаревшие методики, в значительной степени зависящие от опыта и квалификации контролеров и сборщиков.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования по различным методам обеспечения требуемой точности сборочных параметров в многозвенных пространственных размерных цепях освещены в трудах многих ученых: В.Ф. Безъязычного, Е.А. Майоровой, В.В.Непомилуева, А.Н. Семенова, Е.В.Тимофеевой, В.Н. Шишкина, М.Г. Кристаль, И.А. Коганова, В. Г. Осетрова, Е.С. Слащева, В.В. Сибирского, С.К. Чотчаевой, П.Ю. Бочкарева, И.К. Рыльцева, Д. А. Журавлева, М.А. Гаера, Б.М. Базрова, В.Ф. Макарова, С.М. Белобородова и др. В их работах наиболее перспективными методами обозначены вероятностно-статистическая селекция и виртуальная сборка на основе фактических размеров входящих деталей. Однако ранее не проводилось комплексного исследования процессов многокритериального подбора сложнопрофильных деталей, таких как сопловые лопатки турбины ГТД, не сформулированы параметры, позволяющие выполнять их виртуальную сборку для прогнозирования и оптимизации расстановки, и не были разработаны эффективные процессы использования современных цифровых методов измерения для установления фактических значений таких параметров.

**Целью диссертационной работы** является повышение качества сборки сопловых аппаратов турбин ГТД путем внедрения оцифровки и автоматизированного комплектования лопаток для обеспечения требуемых показателей величины и равномерности распределения площади проходного сечения межлопаточных каналов.

**В диссертационной работе для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Создать виртуальную модель технологического процесса фотограмметрической оцифровки для установления оптимальных параметров получения данных о геометрии лопаток, необходимых для подбора.

2. Разработать теоретические положения оптимизации параметров процесса оцифровки сложнопрофильных деталей с использованием созданной модели.

3. Сформулировать параметры отклонений контуров проходного сечения проточного канала соплового аппарата турбины ГТД для подбора лопаток и способ их определения с использованием оцифрованной модели фактической геометрии объекта.

4. Выполнить экспериментальную проверку разработанных моделей и теоретических положений.

5. Разработать алгоритм определения оптимальной последовательности установки лопаток сопловых аппаратов при сборке с учетом их фактической геометрии с целью обеспечения требуемой величины и распределения площади проходного сечения межлопаточных каналов методом подбора.

**Научная новизна работы** состоит в разработке комплекса математических моделей и алгоритмов для создания новой цифровой технологии сборки сопловых аппаратов, призванной обеспечить требуемое качество с минимальными затратами труда, который включает:

1. математическую модель процесса фотограмметрической оцифровки, позволяющую прогнозировать состояние распознавания точки на поверхности измеряемого объекта;

2. теоретические положения и алгоритмы оптимизации стратегий фотограмметрической оцифровки сопловых лопаток и их блоков, позволяющие повысить его производительность и управляемость;

3. алгоритм комплектования лопаток при сборке соплового аппарата с учетом их фактической сложнопрофильной геометрии, позволяющий обеспечить площадь проходного сечения межлопаточных каналов с требуемой точностью.

**Соответствие паспорту научной специальности 05.02.08 – Технология машиностроения:** Работа соответствует формуле специальности, поскольку посвящена исследованию физических и размерных связей с целью создания нового технологического процесса сборки узлов требуемого качества с минимальными затратами труда, а основные результаты соответствуют областям исследования, определяемыми

паспортом специальности в п.3 – «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения», п.4 – «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» и п.5 – «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов».

**Практическая значимость работы** заключается в:

1. повышении точности, стабильности и прогнозируемости параметров качества сопловых аппаратов турбины ГТД при сборке;
2. сокращении трудоемкости изготовления сопловых аппаратов турбины ГТД за счет введения предварительного комплектования лопаток для обеспечения требуемых величин и распределений площади проходного сечения;
3. сокращении трудоемкости операции измерения и контроля геометрии лопаток на основе фотограмметрической оцифровки за счет использования разработанной методики разработки оптимальных стратегий;
4. создании компьютерных программ для определения оптимальных параметров процесса фотограмметрической оцифровки сложнопрофильных деталей и для определения последовательности расстановки лопаток в сопловом аппарате при сборке.

**Методы исследования:**

Исследования, проведенные в работе, реализуют теоретические и экспериментальные методы. Проведенные теоретические исследования основываются на основных научных положениях технологии машиностроения, включая технологическое обеспечение точности деталей и сборочных единиц, технологическую наследственность, с использованием закономерностей оптики, аналитической геометрии, инструментов многопараметрической оптимизации и математической статистики. Использовалось трехмерное САД моделирование в программном комплексе NX и математическое моделирование на основе интерполирования кривых и поверхностей в приложении MathCAD. Экспериментальная часть работы выполнена на основе многофакторных планов и реализована с использованием установки оптической координатно-измерительной фотограмметрической ATOS III и программного обеспечения для анализа фактической геометрии GOM Inspect. Обработка результатов теоретических и экспериментальных исследований выполнена с использованием пакетов программных приложений MathCAD, Microsoft Excel.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обусловлена согласованностью результатов математического моделирования с экспериментальными данными, а также верификацией алгоритмов на модельных задачах.

**Личный вклад автора** – постановка задачи (совместно с руководителем), разработка виртуальной модели процесса оцифровки,

разработка, тестирование и программная реализация теоретических положений и алгоритмов оптимизации стратегий фотограмметрической оцифровки сложнопрофильных деталей, формулировка параметров лопаток для подбора и разработка способа их измерения, разработка алгоритмов и программного обеспечения для определения оптимальной последовательности расстановки лопаток в сопловом аппарате, планирование, проведение и обработка результатов экспериментальных исследований по оцифровке лопаток и сборке с подбором деталей.

**На защиту выносятся** следующие основные положения:

1. Математическая модель процесса фотограмметрической оцифровки, определяющие возможность распознавания точки на снимке.

2. Математический аппарат расчета величины площади проходного сечения межлопаточных каналов по результатам измерений отдельных лопаток на основе виртуальной сборки.

3. Методика расчета оптимальной стратегии фотограмметрической оцифровки полной поверхности сложнопрофильной детали (лопатки), включающая алгоритмы расчета оптимального положения камер для получения изображения наибольшего количества точек с минимальным количеством положений камер и перемещений между ними.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были представлены на международных научных конференциях в 2012-2016 гг. в том числе на 13-й, 14-й международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2012 г, 2013 г.); 13-й Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки" (Нижний Новгород, 2014 г.). XVI Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 17–18 ноября 2015 г.), 5-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2016 г.) В целом диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры «Инновационные технологии машиностроения» (ПНИПУ, Пермь) в период с 2012 по 2019 г.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы переданы для использования на АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь).

**Публикации.** Основные результаты работы представлены в 19 публикациях, из них 1 - в журнале Scopus, 6 – в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК;

**Структура и объём работы.** В состав диссертации входят введение, четыре главы, выводы по работе и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 178 страниц, включая 83 рисунка и 14 таблиц. Библиографический список включает 149 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные научные положения и результаты, вынесенные на защиту.

**В первой главе** выявлены основные проблемы сборки сопловых аппаратов турбины ГТД и выполнен поиск путей их устранения.

Выявлены проблемы существующего технологического процесса изготовления сопловых аппаратов турбины ГТД: нестабильное качество литья, ограничения используемых методов и приспособлений для контроля, необходимость многократного измерения площади проходного сечения и изменения состава комплекта деталей на различных стадиях сборки для обеспечения требуемой точности площади проходного сечения межлопаточных каналов. Для компенсации их негативного влияния на результат сборки предложено ввести две операции, выполняемые в цифровой среде: компоновка деталей внутри узла для стабильного обеспечения требуемых показателей качества и цифровое измерение геометрии лопаток для определения компоновочных параметров.

Анализ литературы по методам обеспечения точности в многозвенных пространственных размерных цепях показал, что поставленной задаче в наибольшей степени отвечает предложенный Непомилуевым В.В. метод индивидуального подбора при виртуальной сборке, но в силу сложнопрофильной поверхности проточной части лопаток, формирующих проходное сечение, для их подбора требуется сформулировать схему расчета и параметры, позволяющие имитировать сборку соплового аппарата в виртуальной среде, а также способы их измерения. В результате анализа методов и физических принципов измерения геометрии сложнопрофильных деталей выбран бесконтактный фотограмметрический метод, установление оптимальных параметров выполнения которого также требует виртуального моделирования. В завершении главы на основании анализа поставленной проблемы и выбора направлений для исследований сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** описаны разработка и верификация математической модели процесса фотограмметрической оцифровки сложнопрофильных деталей. Цель моделирования - установление зависимости между положением камер измерительной установки в пространстве и возможностью распознавания точки поверхности измеряемого объекта при его реализации.

Измеряемый объект представляется в виде дискретного массива точек  $P(x,y,z)$  из его полигональной модели, который интерполируется сплайновой поверхностью  $OBJ(x;y)$  в системе координат, связанной с деталью.

Фотограмметрическая измерительная установка в модели описывается параметрами: угол между осями камер  $\alpha$  и расстояние до центра измерительного объема  $D$  (рис. 1а); фокусное расстояние камеры  $fk$  и размеры матрицы  $am \times bm$  (рис. 1б). А ее положение в пространстве тремя

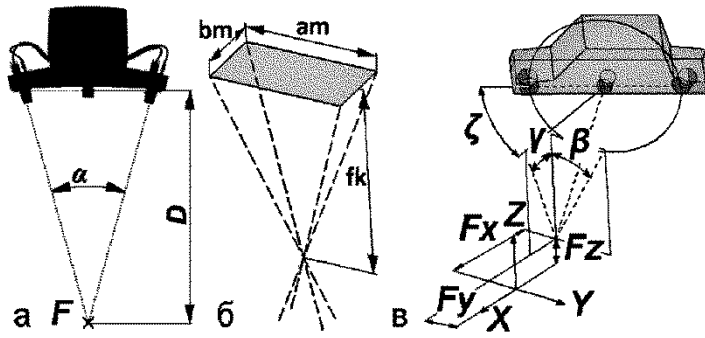


Рисунок 1 - Схема параметров

фотограмметрической измерительной установки: параметры калибровки (а), параметры камеры (б), параметры пространственного положения (в)

линейными смещениями центра измерительного объема относительно системы координат детали ( $F_x, F_y, F_z$ ), двумя углами наклона оси проектора к базовой плоскости детали ( $\beta, \gamma$ ) и углом поворота камер в плоскости базиса ( $\zeta$ ) (рис. 1в). Положения элементов измерительной установки относительно измеряемого

объекта определяются соотношениями, сформулированными на основе ее конструктивной схемы.

В модели сформулированы следующие геометрические условия, которым одновременно должна удовлетворять точка на поверхности объекта, чтобы быть распознанной на снимке цифровой камеры:

1. Точка должна быть расположена внутри зоны обзора камеры (рис. 2а);

2. Между точкой и камерой не должно быть перекрывающих ее обзор элементов объекта измерения (рис. 2б);

3. Отклонение оси камеры от нормали к поверхности в исследуемой точке не должно превышать  $80^\circ$  (рис. 2в).

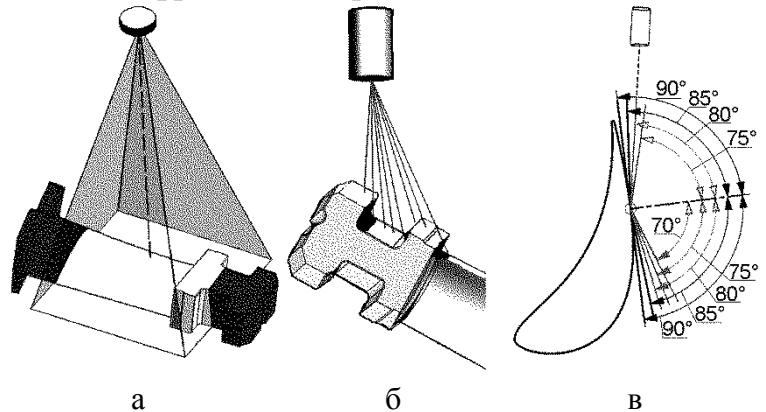


Рисунок 2 - Условия распознавания точки: расположение внутри зоны обзора камеры (а), отсутствие перекрытий (б), угол обзора (в)

Для каждого условия распознавания определяется коэффициент распознавания  $V_{ni}$ , где  $n$  – номер условия, а  $i$  – номер камеры. Если условие выполняется в исследуемой точке, то для нее  $V_{ni}=1$ , иначе  $V_{ni}=0$ .

Для определения видимости точки  $P$  по первому условию распознавания рассчитываются плоскости, ограничивающие зону обзора камеры (рис. 2а) и проводится линия  $FP(t)$ , соединяющая точку  $P$  с центром измерительного объема  $F$ . Поскольку для точки  $F$   $t=0$ , а для точки  $P$   $t=1$ , то положению точки  $P$  внутри измерительного объема соответствуют значения параметра точки пересечения линии  $FP(t)$  с  $k$ -той граничной плоскостью  $t_{ki} \notin (0;1)$ . Если хотя бы один из параметров  $t_{ki} \in (0;1)$ , то точка  $P$  лежит дальше от центра объема  $F$ , чем граница зоны обзора и не может быть распознана.

Второе условие распознавания (рис. 2б) проверяется путем анализа пересечений поверхности  $OBJ$  с линиями  $PK_i(t)$ , соединяющими точку  $P$  с положениями камер, для которых выполняется проверка аналогичная первому условию: если хотя бы один из параметров  $t_{ki} \in (0;1)$ , то точка  $P$



перекрывается другими элементами измеряемого объекта на снимке  $i$ -той камеры и не может быть распознана.

Третье условие распознавания (рис. 2в) проверяется путем анализа углов  $\varphi P_i$  между вектором нормали к поверхности  $OBJ$  в точке  $P$  и направляющими векторами прямых  $KP_i(t)$ . Если угол  $\varphi P_i \in (-80^\circ; 80^\circ)$ , то искажение изображения точки  $P$  на снимке  $i$ -той камеры не препятствует ее распознаванию.

Предполагается, что одновременное выполнение всех трех условий гарантирует распознавание точки на снимке  $i$ -той камеры, а одновременное распознавание на снимках двух камер – получения ее трехмерных координат.

Для верификации разработанных моделей измерительной системы был проведен эксперимент по оцифровке образцов (рис. 3) и измерению координат граничных точек распознанных участков.

Значения параметров конфигурации измерительной установки ATOS III, используемые для моделирования и оцифровки образцов приведены в таблице 1, а значения варьируемых параметров – в таблице 2.

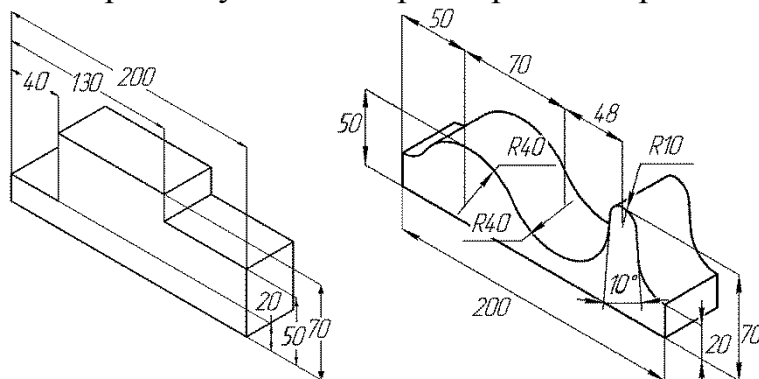


Рисунок 3 - Конструкция образцов, используемых при верификации модели

Таблица 1 – Значения параметров конфигурации ATOS III

D, мм	$\alpha, ^\circ$	fk, мм	am×bm, мм	L×W×H, мм
760	29	35	13,6×13,82	300×300×300

Таблица 2 – Значения варьируемых параметров эксперимента

Параметр	Значения				
	1	2	3	4	5
Fx (Fy), мм	40	80	120	160	200
Fz, мм	-30	-20	-10	0	10
$\beta (\gamma), ^\circ$	-20	-10	0	10	20

Для каждой комбинации варьируемых параметров с использованием разработанной виртуальной модели были рассчитаны распознаваемые участки и выбраны точки, соответствующие их границам. Примеры расчета распознанных участков и их границ приведены на рис. 4.

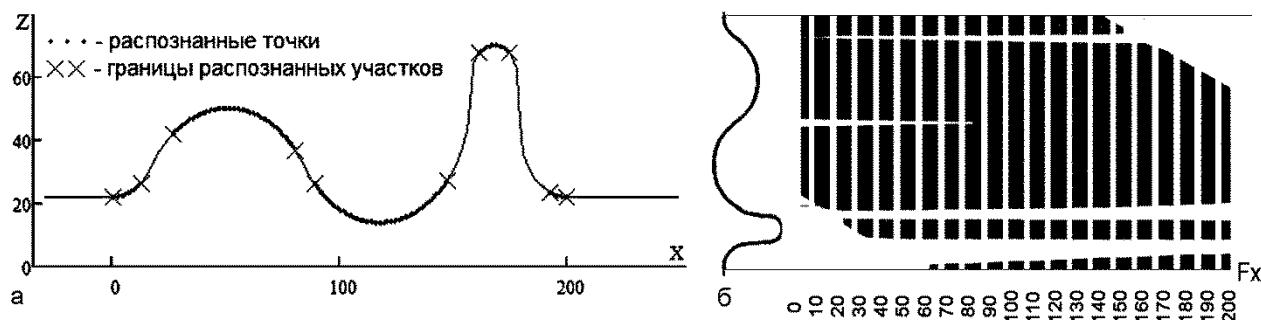


Рисунок 4 - Примеры расчета распознанных участков:  
а – в сечение образца №2 плоскостью XZ, б – изменение распознанной области поверхности образца №2 в зависимости от параметра Fx

При проведении экспериментальной оцифровки с использованием фотограмметрической измерительной системы ATOS III были получены дискретные трехмерные изображения участков поверхности образцов и измерены значения координат их граничных точек.

При сопоставлении распознанных участков, полученных теоретически и экспериментально, установлены пары идентичных граничных точек и рассчитаны отклонения  $\Delta$  (рис. 5) фактических координат границ участков от полученных с помощью виртуальной модели. Результирующее отклонение складывается из погрешности изготовления измеряемой поверхности образца

( $\pm 0,35$  мм), погрешности базирования образца в пространстве измерения, погрешности, возникающей при округлении при расчете, а также возможных ошибок и неучтенных при моделировании факторов,

поэтому при оценке достоверности результатов моделирования приемлемой является величина погрешности в 1 мм.

Полученные в результате анализа экспериментальных данных отклонения не превышают предельно допустимое в 88% случаев. Таким образом, установлено, что приведенные в разработанной модели соотношения для условий распознавания точки при фотограмметрической оцифровке являются достоверными и могут быть использованы для оценки границ участков измеряемых поверхностей реальных деталей.



Рисунок 5 - Пример совмещения теоретического и оцифрованного изображений сечений образца № 2 в плоскости XZ ( $F_x=120$ ,  $F_z=0$ ,  $\beta=0^\circ$ ).

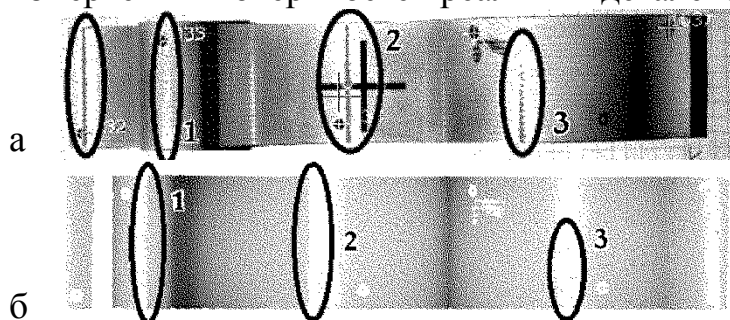


Рисунок 6 - Области избыточного освещения на фотоснимке (а) и разрывы в модели оцифрованной поверхности, возникшие в результате (б).

Также было выявлено, что участки криволинейной поверхности образца, при съемке с малыми углами наклона камер отображаются на снимках как избыточно освещенные («блики») и не включаются в итоговое трехмерное изображение (рис. 6). Такие области возникают на участках поверхности с малым радиусом кривизны при ориентации оси камеры с малым углом отклонения от нормали к поверхности. Предсказать их появление можно, используя эмпирически определенный угол необходимого отклонения вектора ориентации камеры от нормали к поверхности  $\psi_b$ , и проанализировав распределение радиуса кривизны поверхности измеряемого объекта  $RE_i$  около точек экстремума.

Для определения пределов при поиске оптимальных стратегий оцифровки с использованием разработанной виртуальной модели, нужно учесть дополнительные объекты (приспособления для закрепления объекта),

находящиеся в зоне измерения (рис. 7), ограничивающие диапазоны изменения параметров пространственного положения камер ( $PRISP \cap PSB$ ).

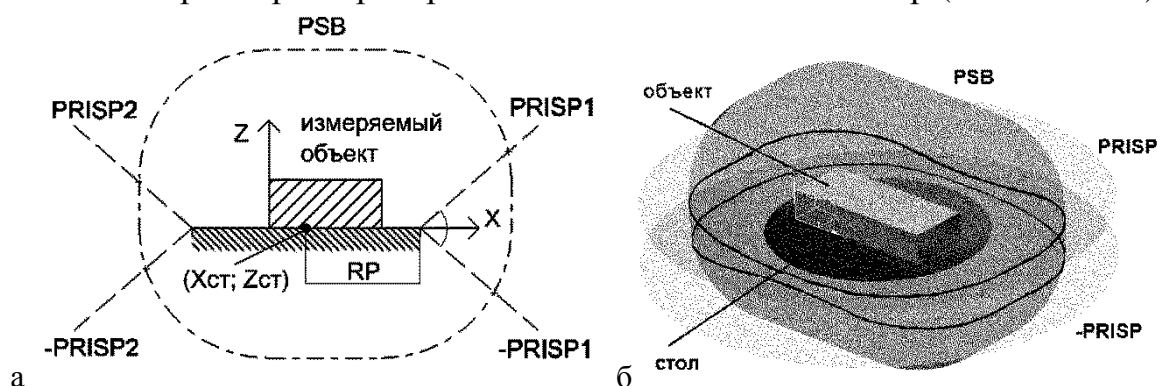


Рисунок 7 - Граница объема возможных положений камер в сечении (а) и в объеме (б).

**В третьей главе** описаны теоретические положения оптимизации стратегий фотограмметрической оцифровки сложнопрофильных деталей, основанные на использовании разработанной виртуальной модели.

Необходимость оптимизации стратегии фотограмметрической оцифровки сложнопрофильных деталей основывается на недостаточной производительности типовых рекомендуемых стратегий, а также на отсутствии возможности при их использовании прогнозировать распознавание отдельных ключевых участков поверхности объекта.

Оптимальная стратегия оцифровки детали предусматривает наибольшую скорость получения данных  $V_o$  (1), т.е. получение полного трехмерного изображения точек ее поверхности за наименьшее количество стереопар снимков, выполненных с кратчайшими перемещениями. В оптимизации стратегии оцифровки сложнопрофильного объекта выделяется два уровня для последовательного рассмотрения:

- структурная оптимизация стратегии проведения фотограмметрической съемки относительно количества и порядка выполнения стереопар при получении полного трехмерного дискретного изображения поверхности объекта ( $n(\{P\}) = \text{const}$ );

- параметрическая оптимизация отдельного положения камер при съемке для получения трехмерных координат наибольшего количества уникальных точек ( $n(\{S\}) = \text{const}$ ).

При оптимизации положений камер для оцифровки отдельного участка объекта на основе топологии дискретной целевой функции, характера и диапазонов изменения переменных положения предложено использовать метод последовательного отсечения заведомо неоптимальной области, реализованный через алгоритм последовательного уточнения координат максимума количества точек, распознанных при реализации положения камер измерительной установки, путем расчета в опорных точках пространства проектных переменных с заданным шагом.

$$V_o = \frac{n(\{P\})}{n(\{S\})} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\{P\}$  – множество оцифрованных точек поверхности объекта,  
 $\{S\}$  – количество выполненных стереопар.

Структурная оптимизация стратегии реализована в алгоритме минимизации площади изображений, перекрывающихся при съемке различных участков поверхности объекта, а также длины пути перемещения между ними.

Разработанные алгоритмы протестированы с использованием моделей одиночных лопаток сопловых аппаратов второй ступени турбины высокого давления. Использование разработанного алгоритма выбора положения камер позволило повысить на базовых и рабочих поверхностях лопатки количество точек, для которых с одного съема получены трехмерные координаты, на 21-47% по сравнению с типовыми рекомендуемыми положениями. Использование алгоритма расчета оптимальной стратегии оцифровки позволило сократить трудоемкость ее настройки и выполнения в 1,3-1,4 раза с получением трехмерной цифровой копии свыше 90% площади целевой поверхности.

Алгоритмы оптимизации реализованы в расчетной программе и рекомендациях для инженеров-технологов по разработке операций контроля геометрии лопаток. Результатом их применения могут являться карта наладки для оператора координатно-измерительной установки с таблицей параметров положений камер для измерения детали, исключая необходимость ручной наладки, или управляющая программа для роботизированной оцифровки.

**Четвёртая глава** посвящена составлению алгоритма расстановки лопаток в сопловом аппарате при сборке для обеспечения требуемой точности величины и распределения площади проходного сечения межлопаточных каналов.

Введены параметры отклонений профиля ( $D_k$  на выходной кромке,  $D_s$  на спинке) и расположения (линейные смещения  $R_x$ ,  $R_y$  и угол поворота  $\varphi$ ) проточной части лопатки (рис. 9), для измерения которых полученная фотограмметрическим методом цифровая копия фактической геометрии лопатки последовательно совмещается с номинальной конструкторской моделью по наилучшему

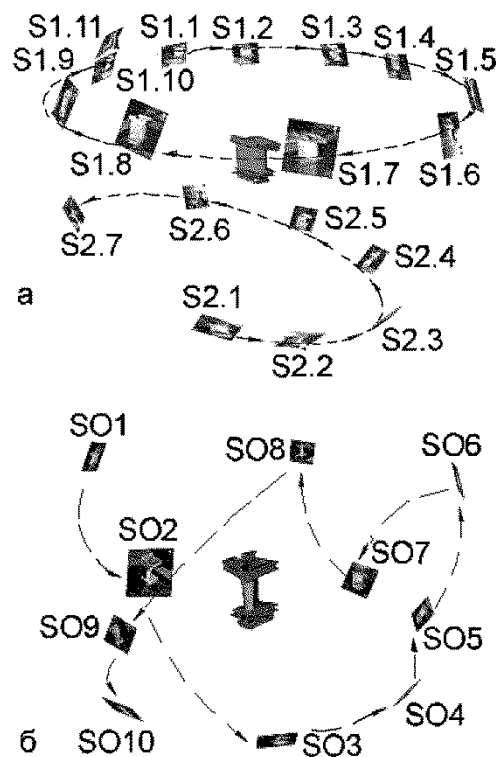


Рисунок 8 - Пример стратегии при оцифровке лопатки до оптимизации (а) и после (б)

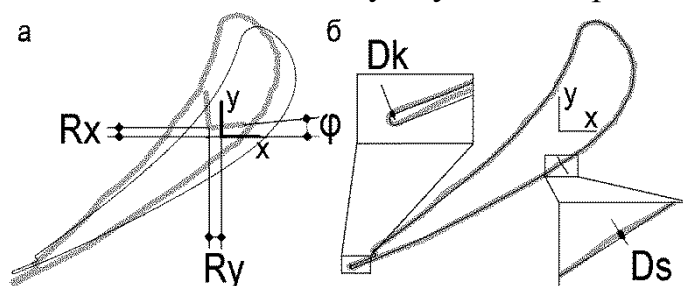


Рисунок 9 – Параметры отклонений профиля (а) и расположения (б) проточной части лопатки

совпадению поверхностей проточной части и сборочных базовых поверхностей (наружные диаметры двух канавок верхней полки, входной торец на уступе верхней полки, боковая сторона стопорного паза). В результате анализа отклонений в партии из 120 лопаток были установлены законы распределения для каждого из параметров, по которым сгенерированы массивы значений для тестирования и сравнения известных и разрабатываемых алгоритмов расстановки.

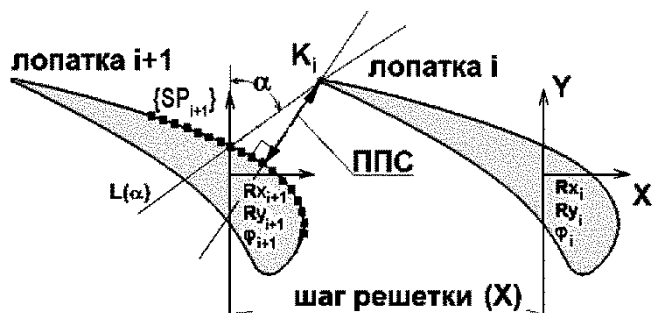


Рисунок 10 – Схема расчета площади проходного сечения межлопаточного канала

$$ППС = |C| \cdot \sqrt{1 + tg^2(\alpha)} - (Dk_i + Ds_{i+1}), \quad (2)$$

где  $C = L \cap spline(SP_{i+1})$

$$L(c) = \begin{bmatrix} Rx_i + Kx \cdot (\cos(\phi_i) + \sin(\phi_i)) + c \\ Ry_i + Ky \cdot (\cos(\phi_i) - \sin(\phi_i)) + c \cdot tg(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\{SP_{i+1}\} = \begin{bmatrix} Rx_{i+1} \{SPx\} \cdot (\cos(\phi_{i+1}) + \sin(\phi_{i+1})) + Xp \\ Ry_{i+1} + \{SPy\} \cdot (\cos(\phi_{i+1}) - \sin(\phi_{i+1})) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Для имитации процесса формирования проходного сечения канала между лопатками была составлена расчетная схема (рис. 10, формулы (2)-(4)), в соответствии с которой вычисляется минимальное расстояние между точкой на выходной кромке одной лопатки канала и кривой профиля второй лопатки, смещенных на величину измеренных для них отклонений.

Целью расстановки является нахождение массива лопаток и последовательности их установки, обеспечивающих

наименьшее возможное отклонение суммарной площади проходного сечения соплового аппарата, а также равномерность распределения площадей проходных сечений отдельных межлопаточных каналов (разноплощадность).

Известные алгоритмы подбора деталей, основанные на сортировке по возрастанию или убыванию одного из параметров с последующей расстановкой по чередующимся позициям, характеризуются низкой трудоемкостью, но при тестировании демонстрируют превышение отклонения достигаемой суммарной площади проходного сечения до 230% величины допуска и недопустимые отклонения площадей отдельных каналов в более чем 50% случаев (рис. 11 а-в). Введение в качестве параметра для сортировки модуля отдельных отклонений и комплексных суммирующих параметров также не обеспечивает достижение требуемой точности и равномерности суммарной площади проходных сечений.

Поэтому был предложен алгоритм прямого подбора, основанный на итеративном пересчете промежуточной величины площади проходного сечения и выборе лопаток, обеспечивающих наименьшие отклонения, как для отдельных межлопаточных каналов, так и для узла в целом. При тестировании алгоритма прямого подбора, основанного на учете отклонений только одного межлопаточного канала, установлено, что требуемые

показатели величины и равномерности распределения площадей проходных сечений отдельных межлопаточных каналов не обеспечиваются (рис. 11 а,г), суммарная площадь превышает верхний допустимый предел на 61% величины допуска, а величина разноплощадности – в 1,6-1,9 раза. Поэтому для обеспечения наибольшей взаимной компенсации отклонений лопаток были рассмотрены алгоритмы подбора с учетом отклонений суммарной площади нескольких последовательных межлопаточных каналов, а также введено условие чередования знаков отклонений для соседних межлопаточных каналов. В результате тестирования вариантов алгоритма прямого подбора установлено, что наилучшие стабильность и точность достигаемого суммарного значения площади при приемлемых затратах времени обеспечивает версия алгоритма, предусматривающая выбор лопатки на основе расчета отклонений площади каналов слева и справа от нее с условием дополнительного чередования знаков (рис. 11 а, д). Суммарная величина площади проходного сечения соплового аппарата и разноплощадность при этом находится в допустимых пределах.

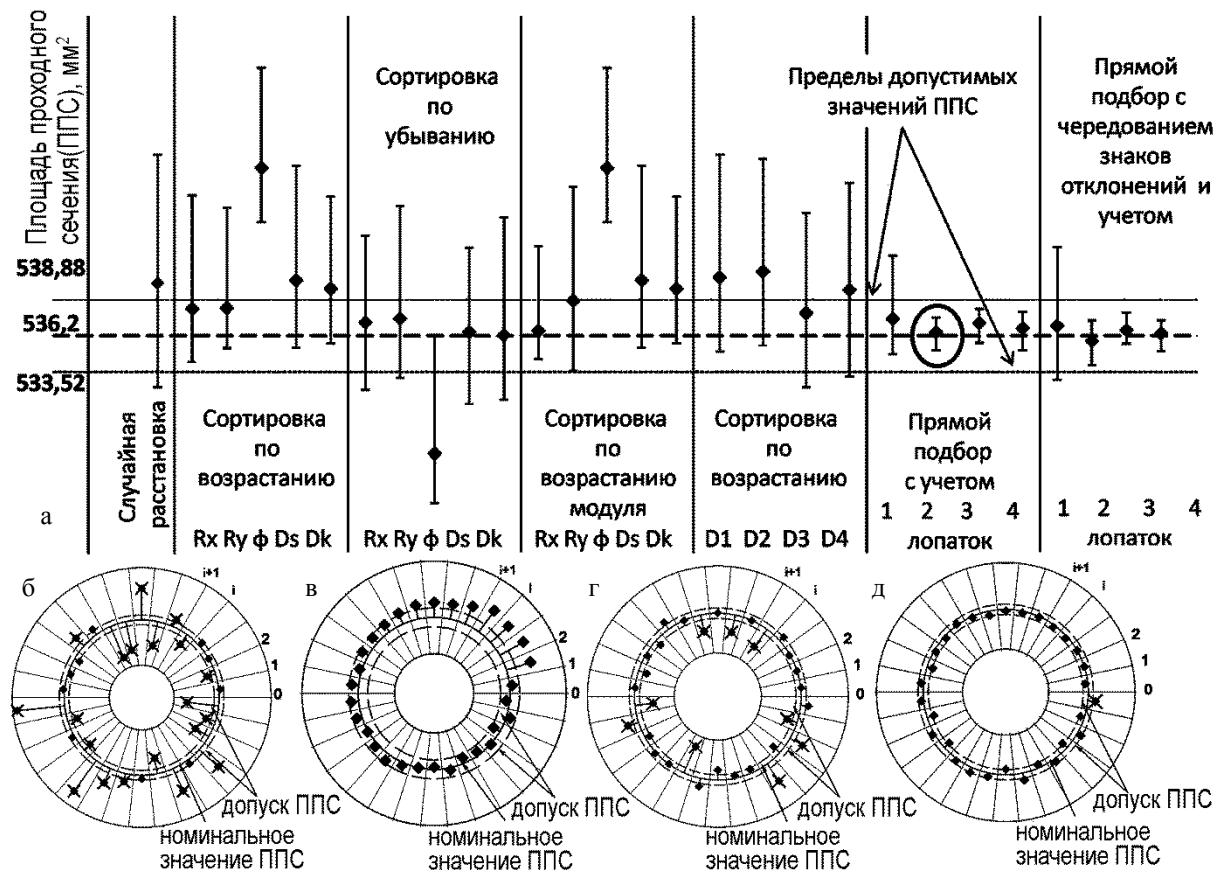


Рисунок 11 - Прогнозируемые значения площади проходного сечения, полученные в имитационной модели: а – сводная диаграмма суммарных значений для различных способов подбора, б – случайное распределение, в – при сортировке по возрастанию  $\phi$ , г – при прямом подборе с учетом одной лопатки, д – при прямом подборе с учетом двух межлопаточных каналов и чередованием знаков.

Для соплового аппарата первой ступени турбины высокого давления в алгоритм прямого подбора введено дополнительное ограничение на

возможные положения для отдельных лопаток относительно жаровых труб камеры сгорания на основе измерения расхода охладителя. Для блоков лопаток турбины низкого давления прямой подбор осуществляется на основе параметров площадей проходных сечений внутренних каналов, отклонения профиля и расположения крайних перьев в блоке.

Разработанный алгоритм прямого подбора реализован в расчетной программе для АО «ОДК Пермские моторы». Исходными данными для расчета являются: файл профиля пера лопатки; файл измеренных параметров в партии лопаток. Результаты выводятся в виде комплектной таблицы с указанием последовательности расстановки лопаток по их индивидуальным номерам и прогнозируемыми значениями площади проходного сечения.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Для исключения из технологии изготовления сопловых аппаратов ГТД трудоемких переборок комплекта и замен лопаток предложена усовершенствованная схема процесса, содержащая новые операции фотограмметрического измерения и компьютерного комплектования;

2. Разработана математическая модель процесса фотограмметрической оцифровки, обеспечивающая прогнозирование состояния распознавания участков поверхности сложнопрофильных деталей с погрешностью определения границ не более 0,27 мм;

3. Применение разработанных теоретических положений оптимизации стратегии оцифровки сложнопрофильных деталей позволяет сократить трудоемкость получения цифровых копий лопаток и их блоков в 1,3-1,5 раза;

4. Вероятность достижения требуемых показателей величины и распределения ППС без переборок при использовании разработанного алгоритма прямого подбора лопаток по отклонениям формы и расположения пера составляет 90%;

5. Внедрение цифровой технологии сборки сопловых аппаратов позволяет снизить трудоемкость сборки и контроля, повысить точность измерения ППС до 0,5 мм<sup>2</sup> (в два раза), повысить к.п.д. и тягу двигателя, конкурентоспособность на мировом рынке

6. Полученные в ходе проведения работы результаты переданы для использования на АО «ОДК-Пермские моторы», ожидаемый экономический эффект составляет более 2 млн. руб. в год.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В рецензируемых изданиях, включенных в базу цитирования Scopus**

1. **Osipovich D. A.** Development and Verification of Mathematical Model of Optical Measuring System/ Osipovich D. A., Jarushin S.G., Melnikov S.A.// International Journal of Applied Engineering Research Volume 10, Number 19 (2015) pp 40481-40487.

**В рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ**

1. **Осипович Д.А.** Разработка технологического процесса контроля деталей типа «рабочее колесо» с использованием оптических методов измерения. // Ползуновский вестник. Барнаул, - 2012 - №2/1, С.184-187.
2. **Осипович Д.А.** Способ контроля геометрии проходного сечения лопаточной решетки соплового аппарата с использованием технологии оптических измерений. // Ползуновский вестник. Барнаул, - 2013 - №2, С.187-191.
3. **Осипович Д.А.** Анализ направлений модернизации методики определения фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS/ Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Червонных С.А. // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2014. - №3. - С. 29-34.
4. **Осипович Д.А.** Оценка применимости оптических методов измерений геометрических параметров для обеспечения качества деталей ГТД/ Осипович Д.А., Нуртдинов А.С.// Естественные и технические науки. Москва, - 2015 – №8(86), с. 38-43.
5. **Осипович Д.А.** Математическое моделирование процесса трехмерной оптической оцифровки геометрии / Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Мельников С.А.//Научное обозрение, Саратов, - 2015 - №17, с. 165-172.
6. **Осипович Д.А.** Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя / Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Макеев А.Б. //Сборка в машиностроении, приборостроении, Москва, - 2018 - №7(216), с. 313-319.