

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Виноградова Василия Юрьевича «Аэроакустическая картография на срезе сопла как метод неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин при их холодной прокрутке», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, материалов и веществ и 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

На официальный отзыв представлена диссертационная работа, состоящая из введения, семи глав, заключения, списка использованной литературы и трех приложений, а также автореферат. Объем диссертационной работы 436 страницы машинописного текста, включающий 184 рисунка, 36 таблиц и 265 наименований списка использованной литературы. Работа написана техническим грамотным языком, каждая глава работы представляет собой полноценное научное исследование с основными выводами, которые могут служить как основой для дальнейших исследований, так и для практического руководства при построении систем.

### Актуальность темы диссертационной работы

Диссертация Виноградова Василия Юрьевича посвящена разработке нового класса неразрушающих методов контроля состояния рабочих лопаток турбомашин, а именно решению важной научно-технической проблемы улучшения метрологических, технико-экономических и экологических характеристик, а также расширения функциональных возможностей систем неразрушающего контроля технического состояния рабочих лопаток турбомашин, основанного на создании и развитии теории и техники аэроакустической картографии, как метода неразрушающего контроля, реализуемого на срезе сопла турбомашины, с использованием акустоэлектрических и газодинамических методов контроля, а также комплексного подхода с применением волоконно оптических методов, 8/06

09 12 13

позволяющего в отличие от существующих локализовать дефектные лопатки в пространстве турбомашины и определить типы их дефектов.

Предложенный теоретический подход, безусловно, имеет потенциал дальнейшего развития, что и подтверждает актуальность диссертационного исследования.

### **Краткая характеристика работы**

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

**В главе 1** проанализировано современное состояние работ по созданию неразрушающих методов и средств контроля, нацеленных на улучшение метрологических характеристик и расширение функциональных возможностей акустического метода неразрушающего контроля рабочих лопаток проточной части турбомашин на срезе сопла, и выявлен ряд недостатков в работах, в которых отсутствуют методы выявления дефектов лопаток, как на срезе сопла турбомашины, так и на ее периферии и определены области проточной части турбомашин, которые с точки зрения безопасности необходимо подвергать неразрушающим методам контроля.

По результатам проведенного сравнительного анализа формулируются цель исследований, научные задачи и перечень направлений исследования.

**В главе 2** описано применение математического моделирования измерительных преобразований аэроакустических параметров газо-воздушного потока при изменении геометрии проточной части турбомашин. Разработаны математические модели возмущенного и не возмущенного газо-воздушного потока в проточной части ГТД, в основе которых лежат экспериментальные данные априорных измерений, с целью определения влияния динамических нагрузок на изменение акустических характеристик выходного потока по окружности и сечению среза сопла турбомашины при холодной прокрутке.

Математическая модель определяет пути прогнозирования поведения зависимых параметров на определенном промежутке времени и позволит рассчитать время развития дефекта  $T_{изм} - T_{расч} \geq 0$ ,

**В Главе 3** предложена теория и техника построения систем аэроакустической картографии на основе акустоэлектрического метода, позволяющего диагностировать состояние рабочих лопаток турбомашины при их холодной прокрутке на срезе сопла. Выявлена закономерность изменения газодинамических и акустических характеристик газовой струи на выходе модели от внесения в нее дефектных лопаток с разной степенью дефекта, от 0,5 до 84 %. Метод позволяет определить взаимосвязь параметров преобразования характеристик газо-воздушного потока, зондирующего проточную часть турбомашины, на характеристики акустического спектра выходного газо-воздушного потока на срезе сопла, с наличием дефектной лопатки и типом дефекта. Наибольший уровень шума генерируется в  $\frac{1}{3}$ -октавной полосе звукового диапазона со средней частотой 20 кГц на режиме продувки  $G = 0,35$  кг/сек. Разработана упрощенная математическая модель процесса генерации шума дефектной лопаткой. Получены патенты на способ и на устройство контроля.

**В главе 4** развита теория и техника реализации неразрушающего метода контроля на базе исследований газодинамических характеристик турбомашин как составляющая акустического метода контроля при холодном пуске для формирования двумерного формата по площади измерений. Выявлена закономерность изменения параметров  $P_{ст}$ ,  $T$ ,  $P_{л}$  по плоскости среза сопла по радиусу, от центра к кромке, которая сохраняется на всех режимах работы от малого до номинального газа для каждой турбомашины. Представлен спектр уровней звукового давления на срезе сопла при испытаниях на экспериментальном стенде на базе НК-8-2 на режиме холодной прокрутки и режиме малого газа, позволяющие понять, что режим холодной прокрутки является оптимальным и более информативным для возможности контроля рабочих лопаток турбомашин. Для прогнозирования состояния турбомашины вычисляется время безопасной эксплуатации двигателя по следующему

алгоритму, который подтвержден в патенте РФ. В заключительной части получена математическая модель взаимосвязи акустических и газодинамических параметров газо-воздушного потока, которая подтверждена в патенте РФ [255]. Получены патенты на способ диагностики и на устройство контроля по акустическим и газодинамическим параметрам, измеренным на срезе сопла турбомашины.

В главе 5 изложены материалы по разработке и применению распределенных волоконных систем для аэроакустического контроля параметров газо-воздушного потока на срезе сопла турбомашин. Представлены критерии с помощью которых можно совершенствовать неразрушающие методы контроля путем создания аэроакустической системы контроля на базе волоконно-оптических сенсорных систем, с помощью которой можно реализовать в трехмерном (3D) формате пространство турбомашины с указанием на предполагаемый тип дефекта. Определены параметры, задающие расположение измерительных линий (ИЛ) в исследуемых областях контроля. Способы размещения ИЛ, обеспечивающие параллельное сканирование области контроля по полярным координатам. Описаны процессы томографии физических полей с дискретизацией, получением и обработкой проекционных данных.

В главе 6 предложен новый подход к определению принципов размещения датчиков для повышения эффективности контроля, алгоритмизации и восстановления параметров пространственного распределения акустических и газодинамических полей по результатам волоконно-оптических измерений в дискретной и/или квази-распределенной совокупности точек.

В главе 7 содержится описание разработанных, апробированных и внедренных аэроакустических систем контроля и диагностики созданных в процессе работы над диссертацией. Получены результаты работы, которые реализованы при внедрении аэроакустических методов, технологий, систем, отдельных программно-аппаратных средств и устройств с представлением оценок и результатов экспертиз по улучшению метрологических и технико-

экономических характеристик, а также расширению функциональных возможностей систем неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток проточной части турбомашин на основе аэроакустической картографии по сравнению с известными.

**В заключении изложены основные выводы и результаты.**

### **Достоверность результатов**

Обоснованность и достоверность результатов определяются: использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами исследований других авторов, с результатами эксплуатации созданных устройств; экспертизами ВНИИГПЭ и ФИПС с признанием ряда технических решений изобретениями, промышленными образцами и полезными моделями, защищенными авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ; публикацией результатов исследований в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК, а также индексируемых в публикационных базах данных Scopus, Web of Science, РИНЦ.

### **К основным научным результатам диссертации относятся:**

1. Определены основы положения теории аэроакустической картографии как метода неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин.

Развита теория аэроакустической диагностики, основанная на контроле параметров газо-воздушного потока на срезе сопла; разработан метод акустической диагностики, обеспечивающий контроль параметров потока по периферии среза сопла; изучено влияние параметров преобразования на акустический спектр выходного газо-воздушного потока; получено соотношение, определяющее их взаимосвязь с местом дефектной лопатки и типом дефекта.

2. Разработана математическая модель эталонного зондирующего газо-

определения параметров по прогнозированию работы динамической системы проточной части турбомашин по ее выходному потоку, по окружности, по сечению среза сопла, для определения местоположения дефектных лопаток и типа дефекта.

3. Определены принципы построения систем аэроакустической картографии на основе разработки и создания акустоэлектрических способов, средств измерений и подходов, учитывающих особенности систем контроля состояния рабочих лопаток на срезе сопла, с выработкой практических рекомендаций по формированию зондирующих газо-воздушных потоков с требуемыми характеристиками по расходу и скорости, для достоверности теоретических результатов, полученных методом сравнения с экспериментальными результатами на реальных турбомашинах с внесением в структуру их проточной части заведомо дефектных лопаток с известным типом дефекта.

4. Разработаны принципы построения комплексных систем аэроакустической картографии, дополненные методами и средствами измерений газодинамических параметров потока на срезе сопла турбомашин, направленные на повышение информативности и уровня алгоритмизации неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток и обеспечивающие получение данных в условиях параметрической и структурной неопределенности газо-воздушного потока, как по контролируемым внутренним сечениям проточной части, так и по выходному сечению на срезе сопла турбомашины. На основании этого построена математическая модель взаимодействия шума дефектной лопатки проточной части турбомашины с параметром неравномерности, позволяющая по измеренным спектрам звукового давления на срезе сопла выдать предварительный анализ технического состояния каждой дефектной лопатки.

5. Разработаны требования к построению единого поля комплексированных волоконно-оптических датчиков для реализации комплексных систем аэроакустической картографии, дополненные методами и средствами измерений газодинамических параметров потока в проточной части

и на срезе сопла турбомашины, с учетом необходимости использования в них универсальных типов датчиков, объединенных в группы.

6. Определены принципы размещения датчиков (координат точек) контроля. Разработаны алгоритмы восстановления оптико-акустических параметров пространственного распределения поля по измерениям в дискретной совокупности точек и при этом решены частные модельные задачи для определения погрешности. Предложена структура аэроакустического комплекса в виде системы автоматического контроля параметров газо-воздушного потока на срезе сопла турбомашины в виде различных по форме измерительных линий контроля в зависимости от формы контролируемых объектов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Приведенные в диссертационной работе результаты позволяют сделать вывод о том, что предложенная автором новая теория и техника аэроакустической картографии как метода неразрушающего контроля на срезе сопла турбомашины с использованием акустоэлектрических и газодинамических методов контроля и комплексного подхода с применением волоконно-оптических методов, позволяет, в отличие от существующих, локализовать дефектные лопатки в пространстве турбомашины и определить типы их дефектов.

### **Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.13«Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и напрямую отвечает следующим пунктам паспорта специальности:

1.«Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (Развита теория аэроакустической диагностики основанная на контроле параметров газо-воздушного потока на срезе сопла; Развит метод акустической диагностики и изучено влияние параметров

получено соотношение определяющая их взаимосвязь с местом дефектной лопатки и типом дефекта. Определены основы положения теории аэроакустической картографии как метода неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин);

и по пункту 2. «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля»(Впервые предложены акустоэлектрические, газодинамические и волоконно-оптические комплексные системы контроля рабочих лопаток турбомашин на срезе сопла);

и по пункту 6. «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля» (Разработаны математические модели зондирующего потока, методики расчета, рекомендации).

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» и напрямую отвечает следующим пунктам паспорта специальности:

1. «Исследование и разработка новых методов и процессов, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов различного назначения» (создана теория аэроакустической картографии через отклик математического моделирования на внешнее и внутреннее зондирование газо-воздушным потоком рабочих лопаток проточной части турбомашины; разработаны принципы построения сенсорных систем, использующих указанные структуры в качестве ВОД для научных исследований в различных областях науки и техники).

**Замечания по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.**

1. По характеру диссертации видно, что автор разработал и изготовил несколько опытных и экспериментальных образцов диагностических систем

гипп — библиотека университета «Пилон» который

позволяет контролировать поля акустических и газодинамических параметров потока на срезе сопла, и было бы правильнее эту систему экспресс диагностики указать в положении выносимой на защиту.

Так как этот результат является важным достижением автора.

2. Исследования акустических и газодинамических параметров на срезе сопла является новым элементом в методах неразрушающего контроля, но нет информации в диссертации о взаимном влиянии, если такое имеется при использовании разных типов датчиков контроля параметров газо-воздушного потока?

3. В главе 4 на стр. 248 в таблице 4.9 даны дефекты и изменения параметров, что свидетельствует об расширенном понимании процессов происходящих в проточной части турбомашин и их неисправностях, но хотелось бы что бы в диссертации прозвучали более научное обоснование изменений параметров от внешних условий.

4. Присутствуют стилистические ошибки и пустая страница 37.

5. В диссертации третья глава посвящена построению систем аэроакустической картографии на основе акустоэлектрического метода, позволяющего диагностировать состояние рабочих лопаток турбомашины при их холодной прокрутке на срезе сопла. В то же время в данной главе приведены натурные исследования дефектов на сопловых лопатках турбины НК-8. Будут ли построены системы с использованием аэроакустической картографии, которые позволят находить дефекты не только на рабочих лопатках, но и на сопловых лопатках турбин и направляющих лопатках компрессора?

6. В диссертации не достаточно полно показаны принципы улучшения экологических характеристик систем неразрушающего контроля при внедрении систем аэроакустической картографии.

Однако отмеченные выше недостатки не снижают ценности полученных результатов исследований в целом и не влияют на общую положительную оценку работы.

## **Заключение**

Диссертационная работа Виноградова Василия Юрьевича, на тему «Аэроакустическая картография на срезе сопла как метод неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин при их холодной прокрутке» является завершенной научно-квалификационной работой, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, обладающее несомненной научной новизной, теоретической и практической ценностью. Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует специальностям: 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» и требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 г.

Замечания по диссертационной работе не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы. Результаты исследования достоверны и апробированы на российских и международных научных конференциях, форумах и семинарах. Уровень и объем публикаций автора, отражающих основные полученные результаты, соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 г.

Диссертация и автореферат содержат совокупность выносимых на защиту положений и полностью соответствуют научным специальностям: 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Диссертационная работа автора может быть представлена к защите на диссертационном совете Д 212.079.09. В целом, диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским

диссертациям, а ее автор Виноградов Василий Юрьевич заслуживает присвоения ему степени доктора технических наук по специальностям: 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Официальный оппонент,  
директор института Электроэнергетики  
и электроники, заведующий кафедрой  
Электроснабжение промышленных  
предприятий ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический университет»,  
доктор технических наук, профессор  Ившин И.В.

420066, Россия, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. Красносельская, д. 51,  
ФГБОУ «Казанский государственный  
энергетический университет»,  
т. 8(843)519-43-46,  
e-mail: kgeu@kgeu.ru



  
03.11.2019

**СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ**  
 по диссертации Виноградова Василия Юрьевича  
 на тему «Аэроакустическая картография на срезе сопла как метод  
 неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин при их  
 холодной прокрутке», представленной на соискание ученой степени доктора  
 технических наук по специальностям: 05.11.13 – «Приборы и методы контроля  
 природной среды, веществ, материалов и изделий» и 05.11.07 «Оптические и  
 оптико-электронные приборы и комплексы» на соискание ученой степени  
 доктора технических наук

Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, ученое звание	Сведения о работе	
		Полное название организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения
Ившин Игорь Владимирович	доктор технических наук (05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов»), профессор	ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51 (843)519-42-73, 519-43-36 Email: ivshini@mail.ru	Директор института Электроэнергетики и электроники Профессор, заведующий кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

№, п/п	Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет
1	Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом / И.В.Ившин // Известия вузов. Проблемы энергетики. Том 20. № 7-8 – Казань: КГЭУ, 2018, с. 107- 117.
2	Бездатчиковый метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия / И.В.Ившин //Известия вузов. Проблемы энергетики № 7-8 – Казань: КГЭУ, 2017, с. 133- 143.
3	Выбор и оптимизация колес турбомашин

	электрической машины возвратно-поступательного движения И.В.Ившин // Электроника и электрооборудование транспорта. № 3. 2017. С. 10-16.
4	Titanium chemical nature features which determine its most important performance properties in linear engine-generator. I.V.Ivshin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 11, NO. 16, AUGUST 2016, pp.9664-9666.
5	The analysis of frequencies of own insulators fluctuations for the solution of a problem of their control. I.V.Ivshin // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 Procedia Engineering 150 ( 2016 ) pp. 2334 – 2339.
6	Устройство управления электрической машиной возвратно-поступательного действия. И.В. Ившин // Патент на полезную модель № 159449 от 18.01.2016 г. Заявка № 2015123936 от 19.06.2015 г.
7	Эффективность методики оценки результатов контроля технического состояния кабельных линий среднего напряжения / И.В. Ившин // Журнал «Энергетика Татарстана» № 2(42) . г. Казань:ООО Печатный двор, 2016. С.68-72.
8	Система привода и нагружения испытательного стенда для электрических машин возвратно-поступательного действия / И.В. Ившин // Журнал «Энергетика Татарстана» № 1(41) . г. Казань: ООО Печатный двор, 2016. С.22-25.
9	Controlled rectifier simulation model development for reversible recipro-cating electrical machine. I.V.Ivshin // International Journal Of Pharmacy & Technology, June-2016   Vol. 8   Issue No.2   14059-14068.
10	Программный комплекс для моделирования электрической машины возвратно-поступательного движения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663605; дата регистрации 25.12.2015. Заявка 2015619478 от 7.10.2015 г.
11	Устройство диагностики кабельных линий. Патент на полезную модель № 153775 от 07.07.2015 г. Заявка № 201432656 от 7.08.2014 г.
12	Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ. «Вестник технологического университета» №5 – Казань: КНИТУ, 2015, Т.18, с. 141-143
13	Numerical Modeling of Dynamic Processes of the reciprocating reversible Electrical Machine. Applied Mechanics and Materials Vol. 792 (2015) pp 134-142. © (2015) Trans Tech Publications, Switzer-land doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.792.134 (Цит.:Scopus).
14	Assessment, Calculation And Choice Of Design Data For Reversible Reciprocating Electric Machine. I.V.Ivshin // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 12 (2015) pp. 31449-31462 © Research India Publications http://www.ripublication.com (Цит.:Scopus).

Официальный оппонент,  
директор института Электроэнергетики  
и электроники, заведующий кафедрой  
Электроснабжение промышленных  
предприятий ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический университет»,  
доктор технических наук, профессор



Ившин И.В.



Сведения подтверждаю

ИВШИН И. В.  
подпись Ивана Викторовича  
Специалист УК ИВШИН О. А. Шакиу  
03.11.2019