

## ОТЗЫВ

Официального опонента на диссертационную работу Виноградова Василия Юрьевича, выполненной на тему «Аэроакустическая картография на срезе сопла как метод неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток турбомашин при их холодной прокрутке» на соискание ученой степени кандидата 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 турбомашин, с использованием акустоэлектрических и газодинамических методов контроля, а также

8107  
09 12 13

комплексного подхода с применением волоконно оптических методов, позволяющего в отличие от существующих локализовать дефектные лопатки в пространстве турбомашин 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 турбомашин, 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 турбомашин 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 турбомашин 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 турбомашин, на характеристики акустического спектра выходного газо-воздушного потока на срезе сопла, с наличием дефектной лопатки и типом дефекта. Наибольший уровень шума генерируется в  $1/3$ -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  $P_{ст}$ ,  $T$ ,  $P_{п}$  по плоскости среза сопла по радиусу, от центра к кромке, которая сохраняется на всех режимах работы от малого до номинального газа для каждой турбомашин. 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 турбомашин 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. Получены патенты на способ диагностики и на устройство контроля по акустически и газодинамическим параметрам, измеренным на срезе сопла турбомшины..

**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 по пространству турбомшины с указанием на предполагаемый тип дефекта. Определены параметры задающие расположение измерительных линий 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.

**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 определяющая их взаимосвязь с местом дефектной лопатки и типом дефекта.

**2. Разработана математическая модель** эталонного зондирующего газо-воздушного потока при холодной прокрутке. Минимизирована погрешность 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 турбомашин. На основании этого построена математическая модель взаимодействия шума дефектной лопатки проточной части турбомашин 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 турбомашин, 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 турбомашин в виде различных по форме измерительных линий контроля в зависимости от формы контролируемых объектов.

### **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.

**Результаты** диссертационного исследования изложены в одной монографии, 41-й работе в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, в том числе 10 статей в журналах по специальности 05.11.13, пять статей по специальности 05.11.07, при этом получено 13 патентов РФ, шесть статей, в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science, семь статей в журналах по смежным специальностям ВАК. Кроме того автор имеет семь единоличных публикаций.

### **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 турбомшины с использованием акустоэлектрических и газодинамических методов контроля и комплексного подхода с применением волоконно-оптических методов, позволяющих, в отличие от существующих, локализовать дефектные лопатки в пространстве турбомшины 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; Развита метод акустической диагностики и изучено влияние параметров преобразования на акустический спектр выходного газо-воздушного потока и 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 турбомшины; 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. Применение для исследований треть/октавного анализатора спектра шума не позволило выявить более узкую по диапазону частот и более информативную область спектра шума и расширить возможности определения положения дефекта, его характера и размера.

2. Экспериментальные исследования акустических параметров, характеризующих дефект рабочих лопаток проводились при продуве проточной части холодным воздушным потоком. Причем было установлено, что больше полезной информации и меньше помех несут потоки со скоростью около 15 м/сек. Можно утверждать, что диагностирование разработанным методом двигателя на "любых режимах до взлетного", не будет эффективно?

3. Определение диагностического признака в области исследуемых частот (20 кГц), в которой наблюдается потеря чувствительности дюймового конденсаторного микрофона, которым проводились измерения, отсутствие исследований шума в диапазоне более 20 кГц;

4. В работе не показано наличие псевдозвука который существенно может изменить диагностические характеристики. Чувствительность конденсаторных микрофонов имеют завал характеристики по частоте, причем тем выше, чем выше рассеянность звукового поля. В работе не показана коррекция акустических данных по частоте излучения потока.

5. В диссертации не полно отражены вопросы повышения принципов экологичности при внедрении аэроакустической картографии как метода неразрушающего контроля и построенных систем на ее основе.

### 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:**

Снигерев Борис Александрович,  
доктор технических наук, ведущий  
научный сотрудник лаборатории  
моделирования технологических  
процессов ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

  
3. 12. 2019

Докторская диссертация защищена по специальности: 01.02.05 - механика  
жидкости, газа и плазмы.

Институт механики и машиностроения - обособленное структурное  
подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр  
Российской академии наук».

420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31.  
Тел.: +7 (843) 231-90-56  
e-mail: snigirev@imm.knc.ru

Подпись	<i>Снигерев Б.А.</i>
ЗАВЕРЯЮ	
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ПРОТОКОЛА И ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	<i>Ильинский П.Р.</i>



## 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»

Фамилия, имя, отчество оппонента	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
Снигерев Борис Александрович	доктор технических наук (01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы)	Институт механики и машиностроения - обособленного структурного подразделения Федерального государственного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр» «Казанский научный центр Российской академии наук» ФИЦ КазНЦ РАН 420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261.	Ведущий научный сотрудник «Лаборатории моделирования технологических процессов» ФИЦ КазНЦ РАН

		Тел.: +7 (843) 231-90-56 e-mail: <a href="mailto:snigerev@imm.knc.ru">snigerev@imm.knc.ru</a>	
--	--	---	--

№, п/п	Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет
1	Математическое моделирование турбулентного потока газас частицами на основе эйлера подхода / Губайдуллин Д.А., Снигерев Б.А. Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2019. Т. 1. № 10. С. 326-328.
2	Numerical simulation the influence of bubbles on the structure and friction of turbulent gas-liquid flow in vertical pipe / Snigerev B.A. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series 2019. С. 042018.
3	Численное исследование турбулентной структуры потока в канале с внезапным расширением / Валеев А.А., Снигерев Б.А. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2018. № 4. С. 17-23.
4	Исследование влияния газовой фазы на структуру турбулентного течения и трение в потоке смеси воды и газа в вертикальной трубе / Снигерев Б.А. Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2018. Т. 28. № 3. С. 395-406.
5	Численное моделирование турбулентного восходящего потока газожидкостной пузырьковой смеси в вертикальной трубе. сравнение с экспериментом / Губайдуллин Д.А., Снигерев Б.А. Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 1. С. 61-70.
6	Numerical investigation the dynamics of vaporization at the flow of liquid methane in channel with variable section / Tukmakov A.L., Tonkonog V.G., Snigerev B.A. Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах). 2017. Т. 789. № 1. С. 012056.
7	Численное исследование турбулентной структуры течения в восходящем полидисперсном пузырьковом потоке / Губайдуллин Д.А., Снигерев Б.А. В сборнике: Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016) Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 78-80.

8	Расчет ламинарного неізотермического обтекания кругового цилиндра с проницаемым слоем / Моренко И.В., Снигерев Б.А. Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2015. № 2. С. 71-76.
9	Особенности неізотермического истечения вязкоупругой струи из ступенчатой формирующей насадки / Снигерев Б.А. Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 1. С. 226-235.

Официальный оппонент  
доктор технических наук



Снигерев Борис Александрович

« 3 » 12 2019г.

**Подпись заверена**

Сведения о Б.А. Снигереве подтверждаю

*Генеральный секретарь ИММ ФШФ КазНЦ РАН  
З. Савур Сидорова З. В.*

