

## **Аэроакустическая картография как метод неразрушающего контроля параметров потока на срезе сопла турбомашин с использованием волоконно-оптических технологий. Постановка задачи**

*В.Ю. Виноградов*

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ*

**Аннотация:** Статья посвящена современному состоянию и основным проблемам неразрушающих методов контроля рабочих лопаток турбомашин, определены области применения неразрушающих методов контроля в проточной части турбомашин. Рассмотрены основные методы контроля; определены причины, ограничивающие возможности данных методов; определены геометрия лопаток, параметры потока, геометрической точки зрения анализировать изменения параметров потока и контролировать работу турбомашин в процессе эксплуатации, позволяет проводить контроль на работающей турбомашине, определены наиболее распространяющиеся дефекты; рассмотрен холодный пуск; определены акустические методы контроля, системы сканирования среза сопла; проведен анализ систем способных осуществлять контроль работоспособности проточной части турбомашин; обозначены математические модели, описывающие акустические процессы в проточной части турбомашин и пути их совершенствования. На сегодняшний день проведен анализ проблем которые направляют нас на разработку новых 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.

**Ключевые слова:** распределенные волоконные системы, аэроакустический контроль, акустическое поле, моделирование процессов, восстановление.

### **Введение**

В настоящей статье рассмотрены современное состояние и основные проблемы неразрушающих методов контроля рабочих лопаток турбомашин, определены области применения неразрушающих методов контроля в проточной части турбомашин. Рассмотрены основные методы контроля; определены причины, ограничивающие возможности данных методов; определены геометрия лопаток, параметры потока, основные дефекты; рассмотрены горячий и холодный пуск; проанализированы газодинамические методы контроля; определены акустические методы контроля, системы сканирования среза сопла; проведен анализ систем способных осуществлять

---

контроль работоспособности проточной части турбомашин; обозначены математические модели, описывающие акустические процессы в проточной части турбомашин и пути их совершенствования.

Проанализировано современное состояние работ по созданию 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.

Для контроля рабочих лопаток проточной части турбомашин необходимо пользоваться информативными и достоверными параметрами в комплексной структуре их понимания [1,2].

Дефекты в рабочих лопатках проточной части турбомашин обнаруживаются в эксплуатации при осмотрах различными приборами, поэтому развитие минимального дефекта до максимально возможного может произойти за короткий временной интервал, что приведет к аварийной ситуации. Существующие средства штатного контроля прогар лопаток не выявляется из-за своей глубины залегания или секторности, по причине того, что дефекты неподвижных частей ничтожно мало влияют на вибрационные характеристики двигателя в целом. Тогда как дефекты в подвижных частях можно выявить и датчиками вибрации.

Разработка и совершенствование методов и средств контроля турбомашин с целью наиболее раннего обнаружения неисправностей в узлах турбомашин и снижение отказов является актуальной задачей по повышению безопасности эксплуатации турбомашин или авиационной техники. Одними из важных факторов, оказывающих влияние на разработку новейших методов и средств контроля рабочих лопаток турбомашин, являются также экологический и экономический факторы. Испытания турбомашин на рабочих режимах требуют значительного расхода топлива и выработки

---



ресурса, вследствие этого актуальна разработка методов и средств контроля рабочих лопаток при холодном пуске. Это даст возможность сократить цикл испытаний за счет исключения режимов более 0,5 от номинального, что уменьшит выработку ресурса двигателя при испытаниях и снизит количество вредных выбросов в окружающую среду.

Совокупный анализ проблем выявил ряд путей усовершенствования поиска дефектов рабочих лопатках проточной части турбомашин неразрушающими методами контроля. Предлагаем рассмотреть поэтапно:

- определить влияние геометрии лопаток на параметры потока в газоздушном тракте турбомашин;
- проанализировать неразрушающие и разрушающие методы контроля;
- выявить информативный метод контроля;
- определить оптимальные режимы работы турбомашин при неразрушающем контроле;
- определить методы и средства контроля, которые могут работать в комплексе для повышения чувствительности, достоверности и информативности идентификации дефектов на срезе сопла;
- выявить оптимальные датчики для сканирования потока.

Решение поставленных задач представлено в следующих параграфах.

## **1. Рабочие лопатки проточной части турбомашин как объект неразрушающего контроля**

По данным различных источников на неисправности и отказы в проточной части приходится от 35 до 90% всех неисправностей.

Дефекты делятся на конструктивно-производственные (случайные отклонения в геометрии профиля) и эксплуатационные (неравномерность

---

воздушного потока при отклонении от нормального режима, различная наработка отдельных узлов, а, следовательно, и износ). Будут рассмотрены эксплуатационные дефекты рабочих лопаток проточной части турбомашин. Компрессор менее подвержен разрушению, так как температура в проточной части небольшая, но давление в КВД возникающее при работе турбомашин может привести к обрыву рабочих лопаток, что приведет к аварийной ситуации.

В работах Хорикова А.А., Костюка А.Г., Капралова В.М., Годовского Д.В., Боришанского К.Н. рассмотрены различные дефекты, встречающиеся в проточной части турбомашин, и методы их контроля.

Контроль параметров потока лопаточных колес компрессоров и турбин можно анализировать через информативность условных КПД. А.В. Бунякин описывает, что их заметное уменьшение может свидетельствовать о развитии таких неисправностей, как забоины и обрывы рабочих лопаток, газовая эрозия. Работа турбины определяется окружной скоростью  $u$  и расходом рабочего тела  $G$ . Эти критерии являются определяющими при изменении работы данной системы (1.1, 1.2).

$$G = m \frac{P_0^x}{\sqrt{\tau_0^x}} F_q(\lambda) \quad (1.1)$$

$$\frac{G\sqrt{T_0^x}}{P_0^x} = m F_q(\lambda) \quad (1.2)$$

Величину (1.2) называют параметром расхода, который постоянен. Для объяснения изменения параметра расхода от изменения сечения проточной части применяется формула (1.3):

$$\frac{G\sqrt{T_0^\delta}}{P_0^\delta} = m \cdot F_{\dot{E}D\dot{N}\dot{A}} \cdot q(\lambda_r), \quad (1.3)$$

где  $F_{\dot{E}D\dot{N}\dot{A}}$  – суммарная площадь поперечных сечений горловин соплового

аппарата блока камеры сгорания, а  $q(\lambda_r)$  – функция плотности тока в горловине соплового аппарата. Т.е. изменение геометрии проточной части при возникновении дефекта будет изменять параметр расхода, который в свою очередь будет изменять  $F_{кр}$ .

С помощью данного метода можно с геометрической точки зрения анализировать изменения параметров потока и контролировать работу турбомашин в процессе эксплуатации. Это позволяет проводить контроль на работающей турбомашине, но не определяя внутреннюю причину того или иного дефекта и допустимых их отклонений от эталона [3-5].

## **2. Методы неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток проточной части турбомашин при холодном пуске**

Существует целый ряд методов неразрушающего контроля на холодном пуске (неработающей турбомашине). Основные из них: визуальный измерительный, оптический метод с применением эндоскопов; ультразвуковой метод; вихретоковый метод; эмиссионно-сцинтилляционный метод; колориметрический метод; капиллярный метод с применением портативных аэрозольных наборов. Методы неразрушающего контроля основываются на контроле, регистрации и анализе и прогнозирования результатов взаимодействия параметров потока с турбомашинной, причем характер этого взаимодействия зависит от геометрической целостности турбомашинной и ее узлов, что представлено на рис.1. Универсального физического метода, способного обнаружить различные дефекты по своей сущности, характеру, глубине залегания, и.т.д., не существует. Определенный метод решает ограниченный круг задач. Рабочие лопатки можно контролировать и визуально-измерительным методом. К нему

---



прибегают при всех видах контроля в начале экспертизы различных видов технических устройств и в заключении, при осмотре изделия после других видов контроля. Рабочие лопатки турбин современных турбомашин и других подобных систем, имеют сложную геометрическую форму. Достоверная информация о фактической толщине стенок лопаток необходима для обеспечения безопасности их эксплуатации в течение назначенного ресурса, а также при механической обработке пера в процессе производства. Практически около 90% эксплуатационного объема контроля относится к визуально-оптическому осмотру с применением жестких и гибких эндоскопов. За ним следует применение ультразвукового и вихретокового методов. Причем, ультразвуковой метод, хотя и значительно сложнее при реализации в условиях эксплуатации, является более надежным при выявлении поверхностных и глубинных дефектов. Эмиссионно-спектральный метод использует явление излучения газа исследуемого вещества в результате нагревания его до температуры свыше 10000°K. При таких высоких температурных режимах происходят процессы, в результате которых, наряду с атомами и молекулами, в потоке газа образуются свободные электрические заряды – ионы и электроны, по которым судят о неисправности. Колориметрический анализ является оптическим способом физико-химического анализа и основан на сравнении окраски пенетранта исследуемого вещества с окраской эталонного перетранта того же вещества. Дальнейшим развитием и совершенствованием колориметрического метода является фотоколориметрический, который отличается более высокой разрешающей способностью и производительностью за счет сравнения цветов техническими средствами. В практике эксплуатации турбомашин применяются также капиллярные методы. Известно применение в условиях эксплуатации метода цветной дефектоскопии совместно с традиционной технологией контроля. Для исследования труднодоступных мест

---

используется специальный эндоскоп с инструментальным каналом и источником ультрафиолетового освещения. Метод резонансных колебаний, рассмотренный С.Ю. Данилкиным, основан на спектральном анализе сигнала с датчика пульсаций статического давления на частоте следования лопаток. Доказано, что на частоте следования лопаток спектральная составляющая изменяется в сторону убывания, и в момент возникновения резонансных колебаний, что служит что может служить признаком дефекта.

Акустические методы интенсивно развиваются, особенно изучение процессов шумообразования при горении и течении газоздушного потока в турбомашине. Одним из перспективных методов контроля является акустический метод. Реальная возможность использования шума работающего двигателя как источника информации о его техническом состоянии, появилась только в недавнее время, благодаря использованию новых технических средств. Чтобы исключить ненадежность субъективной оценки определения состояния турбомашин на слух, понадобилось изучение шума, организация индустрии разработки, производства и применения инструментальных средств для акустических измерений. Непосредственное влияние на появление акустических методов контроля оказало развитие методов вибродиагностики, внедрение в диагностические методы вычислительной техники, развитие работ по изучению процессов течения и горения газа с помощью акустических средств измерения.

Необходимо совместное изучение газодинамических и акустических параметров и процессов, протекающих в реальной турбомашине; а также разработка методов контроля по обнаружению изменения структуры газоздушного потока, в проточной части турбомашин связанного с появлением неисправностей, с целью их обнаружения и прогнозирования для более полного понимания процессов контроля при холодном пуске.

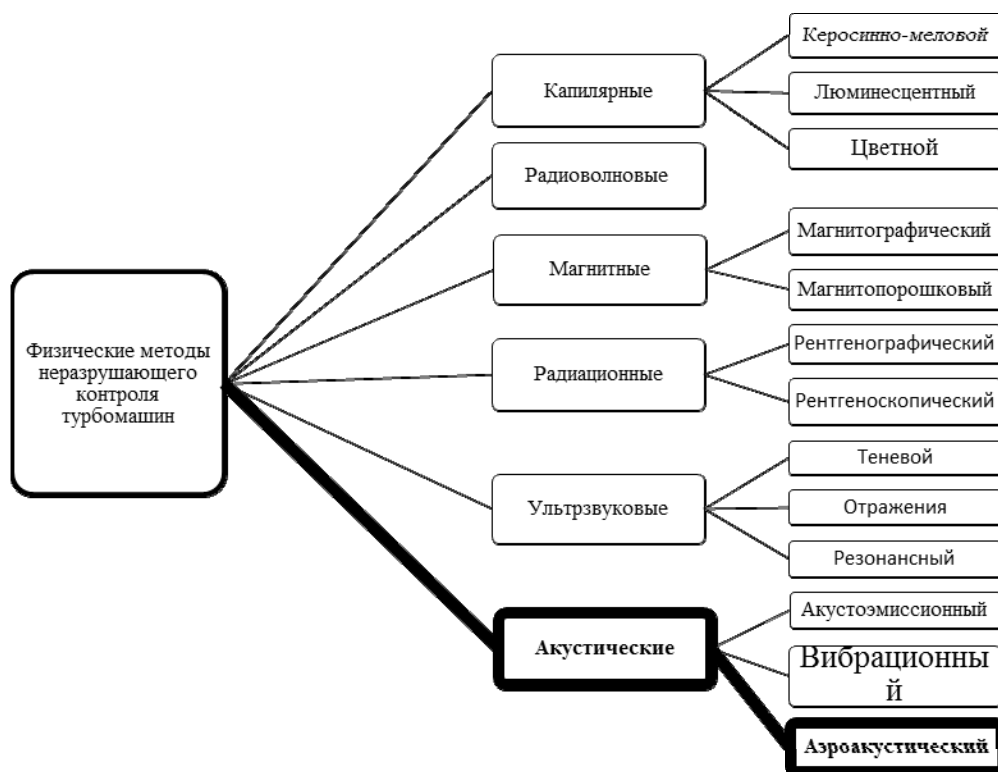


Рис. 1. Переходная цепь преобразования физических методов в аэроакустические

Вывод 1. Акусто-электрические методы контроля привлекательны дешевой реализацией, простотой конструкции. Но они сложны в реализации, т.к. требуют использования акустической камеры для исследования структуры, мощных лазеров для возбуждения отклика от потока.

Вывод 2. Необходимо рассмотреть акустоэлектрические и волоконно-оптические методы как наиболее перспективные, с учетом их реализации в других системах измерения, с возможностью определения перспективности получения требуемых параметров.

### **3. Точечные и распределенные волоконно-оптические датчики для акустического неразрушающего контроля**

Акустические точечные датчики предназначены для контактной и бесконтактной регистрации импульсов воздушного потока. При контактном



измерении частичных разрядов акустическими датчиками регистрируются колебания конструкций высоковольтного оборудования, обычно поверхностей баков и корпусов турбомашин. При бесконтактном измерении регистрируются колебания, передающиеся непосредственно по воздуху. Поскольку воздух менее плотен, чем жидкости, то реальная чувствительность акустических измерений в этом случае оказывается существенно более низкой, чем при контактном измерении.

Основным достоинством применения всех акустических точечных датчиков является то, что их выходная информация наиболее просто поддается расшифровке и анализу, она доступна и понятна персоналу для проведения различных типов диагностики и локации на интуитивном уровне.

#### **4. Волоконно-оптические датчики как новый шаг к совершенствованию технологий акустического контроля турбомашин**

В данном параграфе рассмотрен ряд волоконно-оптических датчиков, которые способны реализовать задачу совершенствования технологии акустического метода контроля. Измерение газовых потоков играет весьма важную роль в машиностроении, мониторинге окружающей среды, контроле промышленных процессов, биотехнологиях, а также в химии и медицине.

Мы предположили, что уровни звукового давления могут быть измерены с помощью оптического волокна для установления характера изменения затухания и точности измерения. Проводя анализ волоконно-оптических датчиков и микрофонов, которые применяются при реализации акустического метода контроля турбомашин установлено, что измерения параметров волоконно-оптическими датчиками происходит на 50% быстрее, чем измерительными системами использующими микрофоны. Зондирование потоков при помощи технологии, используемой в микро-

---

электромеханической системе, имеет много преимуществ по сравнению с традиционно используемыми крупномасштабными аналогами, такими как анемометры, турбины, трубки Пито, термопарами. Современные бортовые системы контроля параметров, включают большой комплекс измерительных систем разной направленности. Среди основных применяемых штатных типов датчиков: датчики давления, перепада давления для воздушного потока, температуры, вибрации, обороты ротора двигателя [6,7,8]

Возможность использования волоконно-оптического датчика обусловлена определенным физическим воздействием и изменением свойств прошедшего, отраженного или рассеянного излучения через оптическое волокно. Выявленные при этом преимущества выводят использование ВОД на новую ступень, при которой контроль с их использованием может быть более продуктивен и обладать высокой точностью. Основные преимущества: это высокая чувствительность, малые габариты и вес, надежность, широкий динамический диапазон измерений, высокая коррозионная стойкость, пожаробезопасность, электроизоляционная прочность, возможность спектрального и пространственного мультиплексирования. Одним из новых и перспективных вариантов ВОД при исследовании механических изменений того или иного материала или газозоудного потока являются датчики с использованием в качестве чувствительного элемента волоконных брэгговских решеток обладающие свойством отражения излучения на определенной длине волны.

По принципу действия волконно-оптические датчики классифицируются на интерференционные (Фабри-Перо, Маха-Цандера и др.), распределенные (обратное и прямое рассеяние), люминесцентные, на внутриволоконных решетках и комбинированные. Наиболее простыми и надежными являются амплитудные датчики, использующие изменение потерь в изогнутых волоконных световодах. Измерительные технологии на

---

основе волоконной оптики обладают следующими преимуществами: высокой чувствительностью, малыми размерами, помехоустойчивостью и др. При этом в измерительных средствах нет важных датчиков (например, анализа деформаций и повреждений внутренних деталей и узлов турбомшины и ли авиационного двигателя).

Распределенные волоконно-оптические датчики (ВОД), обеспечивают много преимуществ, таких как нечувствительность к электромагнитной интерференции, высокую чувствительность, и имеют способность удалённого зондирования, обладают низкой стоимостью и размерами, а также их можно использовать в агрессивных средах.

Таким образом рассмотренные виды измерения, как правило, обеспечивают точность измерения температуры  $\sim 0.1^\circ\text{C}$  и относительного удлинения  $\sim 10^{-6}$ . Эти преимущества дают основания для применения оптического волокна для использования в качестве контролирующего датчика для аэроакустических измерений на срезе сопла турбомшины и ГТД. Можно сделать вывод:

Если точечные датчики хорошо изучены, то датчики поперечного давления по сечениям необходимо рассмотреть, несмотря на то, что они используются для контроля изгиба поверхности.

Для анализа определения перспективности данных систем, анализа их характеристик, необходимо провести предварительно математическое моделирование самого потока и его воздействие или взаимодействие с рассмотренными пунктами 3 и 4 датчиков и средств измерения.

## 5. Математическое моделирование газоздушного тракта турбомашин

Современные турбомашин и ГТД относятся к числу сложнейших технических объектов. При различных условиях эксплуатации в работе турбомашин возникают различные неисправности, обусловленные внешними условиями или режимами эксплуатации, что в процессе их контроля разрабатываются требования, которые усложняют процессы контроля и диагностики турбомашин в процессе эксплуатации. Поэтому встает необходимость применять математические модели для прогнозирования неисправностей на ранней стадии их развития, что снизит риск возникновения аварийных ситуаций. В процессе эксплуатации необходим контроль турбомашин или ГТД при этом используются разнообразное математическое моделирование процессов в комплексе, так и моделирование работы отдельных ее узлов. Весь газоздушный тракт влияет на формирование потока, который мы используем для зондирования в проточной части турбомашин.

Анализ работ позволяет сделать вывод о чувствительности пульсаций давления к изменению геометрии газоз-душного тракта турбомашин а также параметров газоздушного потока на срезе сопла турбомашин. Так пульсации скорости изменяются при образовании нагара на стенках камеры сгорания или при обрывах лопаток турбины. Пульсации скорости в газовом потоке обуславливаются турбулентным характером течения, которое генерирует звук. В теории [9,10,11,12] полагается, что большая часть звука, наблюдаемого вне зоны молчания, излучается из зоны смешения струи, тогда как низкочастотный звук в зоне молчания, который вносит существенный вклад в общую акустическую энергию излучаемую струей, генерируется ниже по потоку. Для приближенной оценки тензора Лайтхилла воспользуемся

---

дозвуковым турбулентным потоком, помещенным в однородную стационарную среду. Поскольку принимается, что вязкие напряжения  $e_{ij}$  в потоке вносят меньший вклад в тензор  $T_{ij}$ , чем напряжения Рейнольдса  $\sigma v_i v_j$ , их отношение имеет порядок числа Рейнольдса  $\sigma UL / \mu$ , а оно велико. В области вне потока будет справедливо акустическое приближение и, следовательно, членом определяемым числом Рейнольдса можно пренебречь. Кроме того влияние вязкости и теплопроводности имеют существенное значение только при очень больших расстояниях, и такой величиной  $e_{ij}$  можно полностью пренебречь. При условии, что число Прандтля равно 1, изменение энтропии будет определяться уравнением сохранения энергии невязкой среды:  $\frac{\partial S}{\partial \tau} + v \cdot \nabla S = 0$  в любом изотропном потоке, в котором

$(P - P_0)/P_0$  и  $(\sigma - \sigma_0)$  малы, что имеет место в дозвуковом потоке без горения, приближенное выражение тензора Лайтхилла  $T_{ij} \cong \sigma_0 v_i v_j$  где,  $\sigma_0 v_i v_j$  - тензор напряжения Рейнольдса, определяемый из характеристик турбулентности. Для расчета акустического излучения струи, сделано допущение, что  $T_{ij}$  - случайная стационарная функция времени тогда и пульсации плотности в поле излучения определены интенсивностью акустического давления:

$$\bar{I}_\omega(x) = \frac{\omega^4 \sigma_0}{32\pi^3 c_0^5} \frac{x_i x_j x_k x_l}{x^6} \int_{-\infty}^{\infty} \int \int e^{i\omega[\tau - (X/x)\eta / c_0]} R_{ijkl}(y', \eta, \tau) \cdot dy' d\eta d\tau \quad (1.6)$$

В том случае, когда твердые границы не оказывают непосредственного влияния на процесс образования акустического поля, где  $R_{ijkl}$  - тензор двухточечной пространственной корреляции турбулентности (источника дефекта). Введение подвижной системы координат позволит получить соотношения, показывающие какие составляющие турбулентности действительно имеют значения в процессах генерации звука. Если ввести четырехмерный тензор спектральной плотности:

$$H_{ijkl}(y', k, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega\tau - k \cdot \xi)} R_{ijkl}(y', \xi, \tau) d\xi d\tau \quad (1.7)$$

при этом получим:

$$\bar{I}_{\omega}(x) = \frac{\pi\omega^4 \sigma_0}{2c_0^5} \frac{x_i x_j x_k x_l}{x^6} \int H_{ijkl}(y', \frac{\omega}{c_0} \frac{X}{x}, \omega \cdot (1 - M_c \cos \theta)) dy' \quad (1.8)$$

Таким образом, показано, что вектор волнового числа в звуковом поле  $(\frac{X}{x})$  и  $(\frac{\omega}{\tilde{n}_0})$  будет таким же, как для генерирующей звук турбулентности.

Однако частота турбулентных пульсаций равна частоте генерируемого звука умноженной на фактор Доплера  $(1 - M_c \cos \theta)$ . Спектр интенсивности звука под углом  $90^\circ$  к оси определен следующей функцией:

$$\bar{I}_{\omega}(x, \varphi, 90^\circ) = \frac{\omega^4 \sigma_0}{32\pi^3 c_0^5 x^2} \int e^{ij\tau} \int R_{1111}^0 d\xi d\tau \quad (1.9)$$

Процессы в различных системах должны быть представлены в виде рабочих портретов на определенных режимах работы изделия. Система представляет собой движущиеся - вращающиеся и неподвижные части. Можно предположить, что в каждой подсистеме генерация звука определена соответствующими уравнениями, в которые заложены присущие ей признаки. Каждая подсистема будет состоять из системы уравнений, которые при изменении геометрических размеров будет изменяться во времени и пространстве. Взаимосвязь различных изменений газовоздушного тракта необходимо будет представить в виде комплексной матрицы состояний. Каждый элемент будет показывать изменение уровней звукового давления во времени в процессе эксплуатации изделия.

Анализ математических моделей показал, что: перед нами встает задача разработки математической модели дефектов рабочих лопаток проточной части турбомашин которая бы удовлетворяла следующим требованиям: - учитывать различные режимы работы турбомашин; - универсальность и взаимосвязь количества исследуемых и критериальных

параметров м.м.;- минимизация к погрешностям результатам измерений; - универсальность применения м.м.к различным исследуемым объектам.

### **Постановка задачи**

1. Акустические методы контроля являются самым перспективным методом так как: акусто-электрические методы контроля нас устраивают по своей дешевизне реализации, простоте конструкции. Акусто оптические нас не устраивают, так как они сложны в реализации, требуют акустической камеры для исследования структуры; но здесь нужны мощные лазеры чтобы возбудить отклик от потока; Волоконно - оптически системы контроля в силу своей распределенности, минимальному сопротивлению потока, и.т.п.

Можно сделать вывод, что необходимо рассмотреть как наиболее перспективные акустоэлектрические и волоконно-оптические методы с учетом их реализации в других системах измерения с возможностью определения перспективности получения требуемых на параметров.

2. Анализ систем контроля привел нас к тому, что на сегодняшний день существует не достаточно средств сканирования для реализации акустического метода неразрушающего контроля состояния рабочих лопаток проточной части турбомашин контролирующихся на срезе сопла при холодном пуске, где можно было бы отметить, где и в каком месте сечения сопла или в каком секторе имеется неисправность в сопловых и рабочих лопатках турбомашин. Но для этого необходимо рассмотреть, как и чем можно измерить и зафиксировать полученные параметры акустического шума который в свою очередь несет много информации о внутренней структуре потока.

## Литература

1. Ахметзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. А.М. Ахметзянов, Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
2. Берестов Л.М. Управление летным экспериментом. Л.М. Берестов. – М.: Машиностроение, 1990. – 144 с.
3. Виноградов В.Ю. Диагностирование технического состояния авиационных ГТД по акустическим и газодинамическим параметрам. В.Ю. Виноградов. - Казань: КГТУ, 2004. – 176 с.
4. Виноградов В.Ю. Контроль. Диагностика // В.Ю. Виноградов № 4 - М.: Машиностроение 1999. - С. 34-37.
5. Виноградов В.Ю. Диагностика состояния газотурбинных двигателей в условиях аэродромного базирования. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. - № 2 -. С.32-35.
6. Морозов, О.Г., Польский, Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // Вестник КГТУ, №4, 1997. С. 27-31.
7. Витрик, О.Б. Проблема «чувствительной кожи» и волоконно-оптические измерительные системы // Соросовский образовательный журнал, Т. 7, № 1, 2001. С. 108-115.
8. Мюнье, Ж. Делиль, Ж.Ю. Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов. ТИИЭР, Т. 75, № 11, 1987. С. 21-38.
9. Рус.Ш. Мисбахов, Рин.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.А. Кузнецов, А.Ж.Сахабутдинов, В.И. Артемьев, В.В. Куревин, В.В. Пуртов, Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных





сетей // Инженерный вестник Дона, 2017, №3 URL:  
ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

10. А.Ж. Сахабутдинов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Г.И. Ильин. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с пи-сдвигом. Постановка задач моделирования // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

11. Marvin E. Goldstein. Aeroacoustics. Moscow, "Engineering" 1981. 289p.

12. Zhou, Y.C. and Wei G.W., High-resolution conjugate filters for the simulation of flows, J. Comp. Phys, 189, No 1, 2003, pp.159-179.

### References

1. Ahmetzyanov A.M., Dubravskij N.G., Tunakov A.P. Diagnostika sostoyaniya VRD po termogazodinamicheskim parametram.[Diagnosis of the state of GTD by thermogasdynamic parameters] M: Mashinostroenie, 1983. 206 p.

2. Berestov L.M. Upravlenie letnym eksperimentom. [Flight experiment control] M.: Mashinostroenie, 1990. 144 p.

3. Vinogradov V.YU. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya aviacionnyh GTD po akusticheskim i gazodinamicheskim parametram [Diagnosis of technical condition of aviation GTE on acoustic and gas dynamic parameters]. Kazan. KGTU, 2004. 176 p.

4. Vinogradov V.YU. Kontrol'. Diagnostika № 4 M. Mashinostroenie 1999. pp. 34-37.

5. Vinogradov V.YU. Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika. 2000. № 2. pp.32-35.

6. Morozov, O.G., Pol'skij, YU.E. Vestnik. KGTU, №4, 1997. pp. 27-31.



7. Vitrik, O.B. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, V. 7, № 1, 2001. pp. 108-115.
8. Myun'e, ZH. Delil', ZH.YU. TIEHR, V. 75, № 11, 1987. pp. 21-38.
9. Rus.SH. Misbahov, Rin.SH. Misbahov, O.G. Morozov, I.I. Nureev, A.A. Kuznecov, A.ZH. Sahabutdinov, V.I. Artem'ev, V.V. Kurevin, V.V. Purtoy., Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017 №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343).
10. A.ZH. Sahabutdinov, O.G. Morozov, I.I. Nureev, G.I. Il'in. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002).
11. Marvin E. Goldstein. Moscow, "Engineering" 1981. 289 p.
12. Zhou, Y.C. and Wei G.W., J. Contr. Phys, 189, №1, 2003, pp.159-179.