

Рис.6. «Сшитый» фрагмент поверхности камеры сгорания

изображения поверхности, что приведет, в конечном итоге, к повышению точности расшифровки температурного поля.

В реальном эксперименте фотографирование термopокpытий проводится после очистки от загрязнений и отметки всех мест повреждения, что позволяет проводить расшифровку температурных полей, в том числе на расстоянии — цифровое фото поверхности при помощи Internet или электронной почты передается в ЦИАМ, и после соответствующей обработки получают температурные карты прямо на фотографии, что удобно и наглядно для испытателей. Кроме того, этот метод позволяет получить температурные карты внутренних поверхностей, например, форсажной камеры без полной разборки.

#### Список литературы

1. Мирная М.Р., Иванов К.А. Разработка и практическое применение термоиндикаторных красок в реальном эксперименте. МСНТ. Новые технологии. Т.3. 2015. с.17-25.
2. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир. 1978. 592 с.
3. Мирная М.Р., Иванов К.А. Разработка и практическое применение термоиндикаторных красок. М.: Мир измерений. 2011. №11.

*Иванов Константин Алексеевич — ведущий инженер, Мирная Мая Роальдовна — ведущий конструктор, Кобцева Анастасия Анатольевна — инженер, Сорожкин Артем Сергеевич — инженер ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Контактный телефон (495) 362-49-27. E-mail: maya@ciam.ru*

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГТД, ИХ ЭЛЕМЕНТОВ И РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ

Д.А. Голенцов, В.А. Лихтер, К.Е. Улыбышев, А.Б. Ватажин (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

*Рассмотрено новое направление в прикладной электрогазодинамике — электростатическая диагностика состояния газотурбинного двигателя (ГТД), а также разрушения металлических тел (элементов двигателей). Указаны причины появления в проходящем через двигатель потоке газа нескомпенсированного электрического заряда. Созданы диагностические системы, с помощью которых проведена диагностика состояния авиационных двигателей в аэродромных и стендовых условиях<sup>1</sup>.*

*Ключевые слова: диагностика, газотурбинный двигатель, электростатический заряд, ток выноса, разрушение тел.*

В ходе полета помимо внешней электризации летательного аппарата, обусловленной обтеканием его потоком газа с многофазными включениями, имеет место внутренняя электризация, связанная с процессами возникновения внутри тракта двигателя нескомпенсированного электрического заряда и, как следствие, нестационарного электрического поля. Этот электрический заряд, выходя наружу с реактивной струей двигателя, формирует так называемый «ток выноса». Одной из причин появления нескомпенсированного заряда является развитие электрических ламинарных и турбулентных диффузионных пограничных слоев на внутренних и внешних поверхностях газодинамических устройств [1]. Второй важной причиной возникновения нескомпенсированного электрического заряда является появление

в потоке электрически заряженных микрочастиц. Было обнаружено, что микрочастицы, образующиеся при разрушении металлических тел, оказываются положительно заряженными [2]. Если разрушающийся металлический элемент двигателя обтекается газодинамическим потоком, то положительно заряженные микрочастицы выносятся газом за срез двигателя, и их вклад в общий ток выноса также оказывается положительным. Заряженными микрочастицами могут также быть: частицы песка, попадающие на вход двигателя при его запуске и разгоне самолета на аэродроме; частицы, содержащиеся в воздухе, засасываемом в тракт стенда из внешней атмосферы; частицы льда, срывающиеся с обледененной поверхности и др.

Измерение характеристик поля, создаваемого заряженными частицами, позволяет получить информацию

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой помощи РФФИ (№ 14-01-00232).

о процессах внутри двигателя на основании следующей причинно-следственной связи: процессы внутри двигателя → нарушение электрической квазинейтральности потока (образование нескомпенсированного электрического заряда) → генерация этим зарядом нестационарного электрического поля → регистрация этого поля специальными устройствами (антеннами). Указанная связь лежит в основе бесконтактной электростатической диагностики авиационных двигателей [3].

Данный диагностический метод позволяет зафиксировать аномальные режимы работы двигателя. Общая стратегия использования метода следующая: предварительно находятся контрольные параметры временных разверток регистрируемых электростатических сигналов (среднеквадратичные отклонения, средние величины, характерные частоты в спектре сигналов и др.), которые в совокупности представляют собой базисный «электрический портрет» двигателя. Затем, по мере наработки двигателя определяется его новый «электрический портрет». Наличие расхождения между базисным и новым «электрическими портретами» двигателя интегрально свидетельствует о нештатной (аномальной) ситуации. Для этого достаточно одной антенны, установленной за срезом сопла двигателя вне его реактивной струи (то есть бесконтактно). Более продвинутым вариантом является установка дополнительных антенн на входе в двигатель или по тракту двигателя, что позволит провести более точную локализацию места появления аномалий или их последствий.

#### Теория антенны

Приведем формулу, с помощью которой можно оценить сигнал, регистрируемый антенной [2]. Пусть сферический зонд с радиусом  $a$  из хорошо проводящего материала расположен в некоторой фиксированной точке вне движущегося сгустка электрического заряда. Зонд соединен с землей через сопротивление  $R$ . В отсутствие зонда в точке имеется обусловленный зарядом сгустка электрического потенциала  $\varphi_e$ , который определяется уравнениями электродинамики. Найдя потенциал  $\varphi$  в окрестности зонда и записав уравнение сохранения заряда для зонда, получаем основное уравнение:

$$a \frac{d\Phi}{dt} + \frac{\Phi}{R} = ae \frac{d\varphi_e}{dt},$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды.

Правая часть этого уравнения известна из решения задачи о нестационарном электрическом поле в окрестности точки расположения зонда. Из решения уравнения находится функция  $\Phi(t)$ , которая таким образом зависит от величины  $\varphi_e$ . Отношение первого и второго членов в левой части уравнения по порядку величины равно безразмерному параметру  $Rv$ , представляющему собой отношение характерного времени стекания заряда в электрической цепи зонда к характерному времени пролета заряда около зонда. Этот параметр мал, поэтому решение уравне-

ния можно приближенно представить в виде  $\Phi = \varepsilon Ra \frac{d\varphi_e}{dt}$ . Это и есть формула для оценки величины ожидаемого сигнала.

#### Диагностика разрушения металлических тел

Возможность диагностики разрушения металлических тел (элементов двигателя) основывается на том факте, что микрочастицы, образующиеся при разрушении металлических тел, оказываются положительно заряженными. Это подтверждено лабораторными экспериментами. В качестве разрушаемых металлических тел используются пластины или проволока, закрепляемые в специальном устройстве. При этом место крепления сделано так, чтобы пластина была электрически изолирована от остальных элементов установки. Образцы разрываются растягивающей силой. Место разрыва обдувается потоком воздуха, и образующиеся при разрыве образца заряженные микрочастицы сносятся воздухом вниз по потоку.

В экспериментах регистрировался ток в цепи разрушаемого образца. Этот сигнал возникает одновременно с началом непосредственного разрыва образца. (Строго говоря, в данном случае измеряется не ток, а напряжение, но, зная сопротивление электрической цепи (1 МОм), можно найти величину тока.)

Второй сигнал, который регистрируется сеточной антенной, установленной вниз по потоку от разрушаемого образца, является электростатическим сигналом, возникающим при пролете около нее сгустка заряженных частиц. На рис. 1 показаны зарегистрированные сигналы с образца и пролетный сигнал. Это подтверждает факт образования заряженных частиц при разрушении тел и возможность регистрации этого процесса. Также в ряде случаев можно зарегистрировать не только полный разрыв образца, но и его частичный надлом. Это позволяет фиксировать процесс начала разрушения тела.

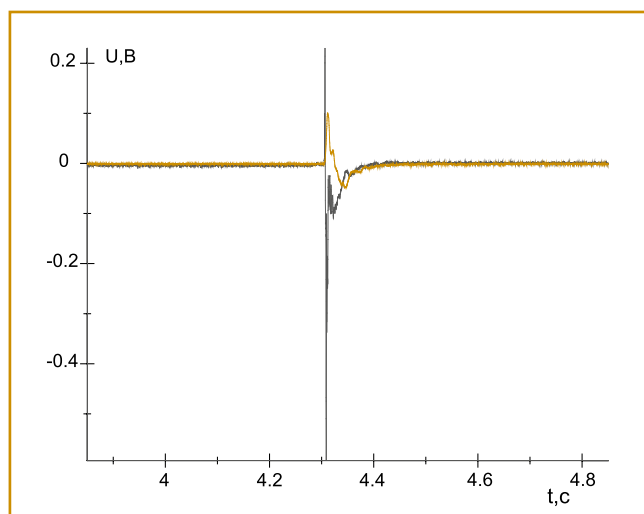


Рис. 1. Сигнал с образца (черная кривая) и пролетный сигнал (коричневая кривая) при разрыве пластины

Теоретические основы электризации тел при разрушении в данный момент разрабатываются. С некоторыми положениями можно ознакомиться, например, в [4].

Укажем важное обобщение указанной идеологии. Во многих устройствах (двигательных и энергетических) в настоящее время все шире используются не только металлические, но и композитные материалы. Как оказалось, при разрушении же из композитных материалов также образуются заряженные частицы. Поэтому разрушение таких тел можно регистрировать средствами электростатической диагностики.

#### Натурные и стендовые испытания

Разработанная методология электростатической диагностики применялась при испытаниях ГТД и их элементов на стендах ЦИАМ и аэродромном стенде в ОАО «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова» (г. Жуковский). На аэродромном стенде использовалась антенна, устанавливаемая за срезом сопла двигателя. Дополнительно в ряде экспериментов устанавливалась вторая антенна на входе в воздухозаборник. В ходе испытаний были получены «электрические портреты» двигателя на штатных режимах работы от запуска двигателя и малого газа до форсированного, а также «электрические портреты» ряда аномальных режимов, таких как незапуск форсажа, нестационарное горение, повышенный расход топлива, помпаж, попадание посторонних предметов на вход в двигатель.

В качестве регистрирующих устройств использовалась плата АЦП NI DaqPad-6070, подключенная к переносному компьютеру, а также специально разработанное диагностическое устройство для регистрации штатных и ряда нештатных режимов работы двигателя средствами электростатической диагностики. Для их работы были сформулированы алгоритмы. Общая суть работы алгоритмов заключалась в следующем.

Контроль исправности двигателя осуществлялся проведением амплитудно-частотного статистического анализа зарегистрированных пульсаций электростатического поля, создаваемого присутствующими в струе заряженных частиц. В качестве контрольного параметра выбиралось среднее квадратичное отклонение (СКО) сигнала по заданной выборке точек в течение времени контроля с заданной частотой опроса. Вычисленное СКО сравнивалось с заданной эталонной величиной (СКО<sub>эт</sub>), зависящей от режима работы двигателя. Назначение величины СКО<sub>эт</sub> и величины его допустимого превышения происходило по результатам предварительных испытаний «здорового» двигателя. При выходе текущей величины СКО из заданного диапазона проводилось сравнение трех последующих значений СКО с эталонным для «отсечения» случайных выбросов в сигнале из-за пролета одиночных заряженных сгустков. Если контрольные значения СКО также находились вне допустимых пределов, то производился контроль параметров работы

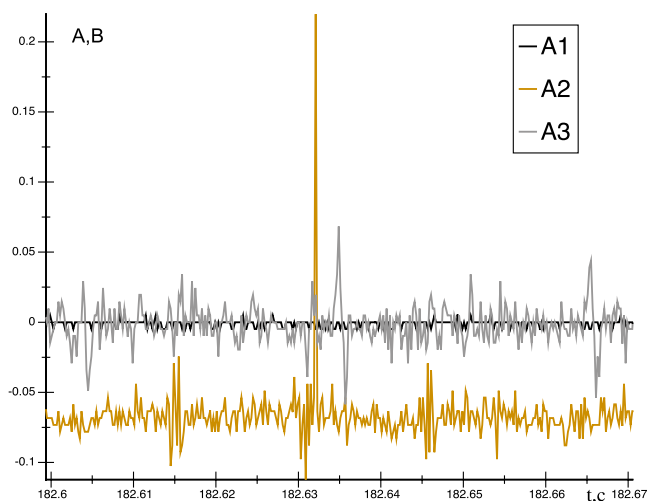


Рис. 2. Зарегистрированные сигналы при стендовых испытаниях газогенератора

двигателя (например, обороты двигателя) на возможность наличия в данный момент переходного процесса. В случае отсутствия в данный момент времени переходного процесса выдавался предупреждающий сигнал для смены режима работы двигателя и анализа ситуации другими средствами стенда.

Такой же анализ может проводиться и в частотном диапазоне сигнала. Характерные газодинамические частоты движения заряженных частиц определяют в спектре мощности анализируемого сигнала и при появлении частот, отличных от эталонных и определенных заранее, выдается предупреждающий сигнал. Таким способом можно диагностировать, например, нестационарное горение или срывные режимы работы двигателя.

Обработка метода электростатической диагностики в стендовых условиях проводилось при испытаниях газогенератора (ГГ) на стенде НПЦ газотурбостроения «Салют».

Использовались три антенны. Антенна 1 находилась в трубопроводе, подсоединенном на вход ГГ; антенна 2 устанавливалась в штатное отверстие в корпусе ГГ за компрессором; антенна 3 — на выходе из ГГ. В ходе проведенных экспериментов зафиксировано несколько случаев касания лопаток компрессора о корпус. Характерный наблюдаемый сигнал показан на рис. 2. На рисунке коричневой кривой соответствует выброс в сигнале антенны 2, серой кривой — в сигнале антенны 3. Задержка по временной шкале соответствует времени пролета образовавшихся заряженных частиц до выхода ГГ. При этом антенна 1 не зарегистрировала пролета частиц, следовательно источник заряженных частиц — внутридвигательный и связан с кратковременным касанием лопатки компрессора о корпус, что подтверждалось другими средствами измерений.

Еще одна область применения метода — диагностика элементов стенда. Для этого антенны размещаются не только за, после и внутри исследуемого объекта, но и рядом с важными элементами стенда.

Например, установка антенны в воздушный трубопровод на входе в стенд позволит контролировать чистоту воздуха, поступающего в магистрали стенда. Если установить антенну за подогревателем, нагревающим воздух, поступающий в исследуемый объект во избежание обледенения его элементов на определенных режимах работы, то можно контролировать процесс выхода подогревателя на стационарный режим работы и определять момент начала измерений. Такая система антенн устанавливалась на стенде ЦИАМ при испытаниях модели турбины, что существенно повысило информативность эксперимента.

На рис. 3а показана антенна, устанавливаемая в тракт стенда или внутрь двигателя, а на рис. 3б антенна, помещенная в тракт стенда. Чувствительный элемент показан коричневым.

Антенна устанавливается так, чтобы чувствительный элемент находился «заподлицо» или был чуть «утоплен» в стенку канала, чтобы избежать его прямого контакта с потоком (напомним, что электрический сигнал формируется на антенне посредством электростатического поля от присутствующих в потоке заряженных частиц, то есть бесконтактно).

На рис. 4 показана схема установки антенн на стенде при испытании модели турбины. Воздух, необходимый для работы стенда, поступает через трубопровод 1 и перед входом в испытываемый объект 4 (турбину) подогревается в специальном подогревателе 2 во избежание обмерзания элементов стенда (в частности, насадок полного давления). Другая часть возду-



Рис. 3а. Электростатическая антенна



Рис. 3б. Антенна в трубопроводе стенда

ха через байпас 3 проходит мимо подогревателя и подмешивается к первой части для обеспечения заданной температуры потока на входе в турбину.

Входной воздушный поток контролируется антенной (а). Эта антенна регистрирует наличие частиц в потоке воздуха перед подогревателем. Это могут быть частицы пыли, грязи, попавшие в поток из трубопровода или извне. Антенна (b) установлена за подогревателем и контролирует его работу — момент выхода подогревателя на требуемый режим работы после розжига и стабильность его работы в ходе проведения эксперимента. Вход в турбину контролируется антенной (c). Еще одна антенна (d) устанавливается на выходе из турбины для регистрации заряженных частиц в «затурбинном тракте», а также для выявления «внутритурбин-

ных» источников заряженных частиц и аномалий в работе турбины. Характер сигнала на установленных в тракте стенда четырех антеннах дает возможность определить момент выхода на стационарный режим находящихся в тракте стенда вспомогательных устройств. Основной показатель такого режима — отсутствие выбросов во временных развертках сигналов.

#### Список литературы

1. Ватажин А.Б., Улыбышев К.Е. Модель формирования электрического тока выноса в каналах авиационных реактивных двигателей // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 139-148.
2. Ватажин А.Б., Голенцов Д.А., Лихтер В.А. Электрическая диагностика разрушения металлических тел в газодинамическом потоке // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 1. С. 81-91.
3. Ватажин А.Б., Голенцов Д.А. и др. Электростатическая диагностика состояния элементов летательного аппарата и двигательных и энергетических устройств: теория, система диагностики, лабораторные и стендовые испытания // Статья в сборнике. Теоретическая и прикладная газовая динамика в 2-х т. Т. II. Под ред. С.Ю. Крашенинникова. М. Торус Пресс, 2010, С. 261-290.
4. Голенцов Д.А., Ватажин, Улыбышев К.Е. и др. Электростатическая диагностика разрушения материалов // Сборник докладов XI Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики". Петергоф. 2015. С. 334-337.

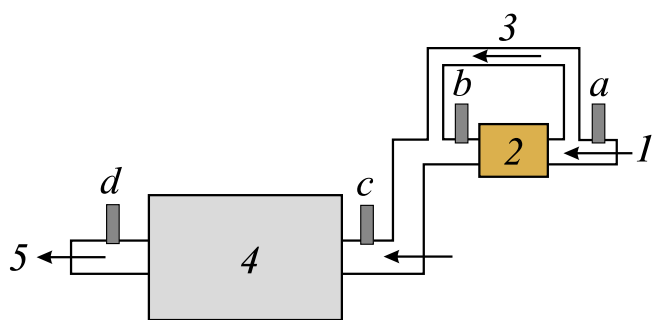


Рис. 4. Схема установки антенн на стенде

**Голенцов Дмитрий Анатольевич** — канд. физ.-мат. наук, начальник сектора,  
**Лихтер Владимир Абрамович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
**Улыбышев Константин Евгеньевич** — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник,  
**Ватажин Александр Бенцианович** — д-р физ.-мат. наук, начальник сектора  
 ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».  
 Контактный телефон (395) 362-00-65.  
 E-mail: dep010@ciam.ru