

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОКРАСОК

М.Р. Мирная, К.А. Иванов, А.А. Кобцева, А.С. Сорожкин (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Термометрирование элементов авиадвигателей, в том числе из новых конструкционных материалов, используемых в высокотемпературных камерах сгорания и элементах конструкции турбины, проводится с помощью многопереходных термокрасок, которые обеспечивают возможность получения наглядной информации о температурах поверхности без искажения ее в исследуемом месте. Для автоматизации определения температурных полей, полученных с использованием термокрасок, была опробована методика расшифровки температур термопокрытия по цифровой фотографии поверхностей после эксперимента. Фотографирование объектов с помощью цифровых фотоаппаратов требует предварительной разборки двигателя после проведения испытаний, к тому же такой технике недоступна съемка труднодоступных поверхностей сложной формы. Для преодоления этих ограничений была рассмотрена возможность использования видеоэндоскопа OLIMPUS IPLEX FX для фотографирования термопокрытий. Для получения общей качественной картины объекта используется фрагментарный метод съемки с последующей "склеивкой" полученных изображений в единое целое. Это приводит к необходимости разработки метода панорамной "склейки" отдельных фрагментов изображений термопокрытия для получения качественной развертки исследуемой поверхности с целью дальнейшей расшифровки температурного поля.

Ключевые слова: термометрирование, многопереходные термокраски, фотоаппарат, видеоэндоскоп, температурное поле, авиадвигатели.

### Введение

Для создания перспективных двигателей нового поколения с высокими удельными параметрами и модернизации ранее разработанных требуется решение целого ряда измерительных задач, в частности, измерение полей высоких температур на поверхностях элементов авиадвигателя: камер сгорания, газосборников, сопловых аппаратов и др. Температурные и тепловые измерения являются неотъемлемой частью экспериментальных исследований узлов, газогенераторов и двигателей в целом. В процессах нагрева важно знать распределение температур по поверхности, при этом предпочтительно использовать многопереходные термоиндикаторы (термокраски), которые имеют несколько цветовых переходов в широком интервале температур. Термоиндикаторы не вносят существенных изменений в температурное поле, почти не влияют на количество излучаемого поверхностью тепла и на распределение температуры по исследуемому изделию. Таким образом, получаемая при исследовании наглядная информация о распределении температур по поверхности не содержит искажений, связанных с установкой температурных датчиков. Термокраски дают возможность измерять температуру труднодоступных поверхностей практически любой формы, что позволяет использовать их в местах, недоступных для других средств измерения.

### Термокраски как средство измерения полей температур поверхности

Авторами разработана серия термокрасок, рассчитанных на температурный диапазон 50...1750 °С и экстремальные внешние условия [1]. Эти термокраски представляют собой оригинальные многокомпонентные составы. Значения температуры цветовых переходов термокрасок подобраны таким образом, чтобы обеспечить равномерную индикацию в широком интервале температур. Для каждой из термокрасок раз-

работана технология получения и определены основные технические характеристики, необходимые для их практического применения. Термокраски ЦИАМ по многим показателям (верхнему пределу индикации, числу цветовых переходов в одной термокраске, что обеспечивает большую точность измерения температуры поверхности) сравнимы, а по некоторым показателям превосходят лучшие из известных многопереходных зарубежных термоиндикаторов. Неоспоримым преимуществом этих термокрасок является то, что они фиксируют максимальную достигнутую температуру и сохраняют свой цвет неограниченно долго после снятия температурного воздействия. После охлаждения исследуемой поверхности картина распределения температур сохраняется, таким образом ее можно зафиксировать для дальнейшего изучения. Однако термоиндикаторы позволяют определять лишь максимальное значение температуры, так как они показывают лишь, какая температура была или не была достигнута, а заявленная точность измерений с их использованием составляет 6°С. Осмотр в некоторых случаях возможен только после окончания испытаний, в то же время фиксация изменений на цифровые носители с целью последующей обработки требует применения дополнительной аппаратуры. Тем не менее, эти особенности нельзя называть недостатками, так как они лишь определяют круг задач, для которых пригодны термокраски.

Температура относится к тем физическим величинам, определение которых связано с использованием каких-либо свойств вещества, поддающихся непосредственному измерению. Основным физическим носителем информации термокрасок является цвет. Практически единственным применяемым в настоящее время методом соотнесения цвета и температуры является визуальное сравнение с цветовым эталоном. Поскольку нет двух людей, идентично воспринимающих цвет, такой метод может привести к значитель-

ным ошибкам в определении цвета, а следовательно, не исключено влияние субъективного фактора в оценке и наименовании цветов, то есть температуры. Это не имеет большого значения при применении однопереходных термокрасок с контрастными цветовыми переходами. При использовании многопереходных термокрасок, имеющих как контрастные (фиолетовый — зеленый, белый — оранжевый), так и оттеночные (сиреневый — светло-сиреневый) цветовые переходы, повышаются требования к опыту работы и цветовому зрению оператора.

Многолетний опыт использования термокрасок позволил разработать методику проведения эксперимента по исследованию теплового состояния поверхности элементов авиадвигателя. Расшифровка показаний термокрасок является важным этапом их применения. Для экспресс-контроля используется традиционная методика расшифровки температурных полей: после испытаний и очистки термопокрытия от загрязнений на поверхность наносили изотермы, которые затем фотографировали. Это представляло некоторое неудобство для исследователей, так как было сложно привязать результаты испытаний к объекту. Впоследствии метод был усовершенствован: на развертке или чертеже камеры сгорания, используя опорные точки, получали карты температурных полей поверхности, что было более удобно конструкторам при доводке, например, камеры сгорания. Конструкторы могли делать выводы по усовершенствованию, например, системы охлаждения объекта.

**Компьютерная расшифровка температурных полей**

Для упрощения работы оператора и увеличения точности расшифровки разработана методика, включающая компьютерную расшифровку температурных полей по цифровой фотографии поверхности с нанесенным термоиндикаторным покрытием. Затем этот метод был автоматизирован с использованием компьютерного атласа цветовых зон термокрасок и включал компьютерную расшифровку по цифровой фотографии термоиндикаторного покрытия после теплового воздействия.

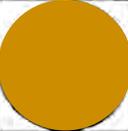
№ зоны	Температурный интервал, С	Цвет зоны	Экспериментальный образец	Образцы цвета зоны	Координаты цвета в системе RGB
1	исходный	светло-жёлтый			R (126...145) G (122...141) B (59...78) H (54...58) S (44...56)% B (49...57)%
2	109-153	жёлто-серый			R (101...103) G (117...120) B (90...96) H (96...105) S (20...23)% B (46...47)%
3	153-326	жёлто-коричневый			R (75...81) G (70...84) B (50...56) H (48...66) S (25...37)% B (29...33)%

Рис. 1. Атлас цветовых зон термокраски ТК 19

Типичная процедура прогнозирования соответствия цвета при использовании теории Кубелки-Мунка состоит в следующем [2]:

- изготовление стандартных образцов с заданными компонентами;
- определение основных колориметрических характеристик стандартных образцов;
- создание базы данных в вычислительной машине;
- контроль прогнозируемого цветового соответствия.

Для получения качественного образца цветовой зоны термоиндикаторного покрытия требуется большая зона однородного температурного поля. Для этого используется специальная печь с трехсекционным нагревателем (центральный и два боковых). Равномерность температурного поля печи достигается форсированием мощности боковых нагревателей. Образцы термоиндикаторного покрытия испытываются на разных температурных режимах, подобранных таким образом, чтобы температура в равномерной области печи соответствовала середине цветовой зоны.

На основании трехкомпонентной теории цветового зрения построена единая система классификации цвета RGB, по которой цвет может быть выражен тремя числами — координатами цвета, определенным образом связанными с реакциями цветоощущающих приемников глаза. Законы оптического смешения цветов дают возможность записать цветовые равенства, то есть однозначно обозначить любой цвет уравнением. Приняв за основные цвета (линейно независимые цвета, на которых основана система классификации цвета) R — красный (red), G — зеленый (green), и B — синий (blue), цвет Ф любого излучения можно получить путем смешения цветов R, G и B, взятых в некоторых определенных пропорциях, указывающих, в каких количествах смешиваются излучения единичных основных цветов.

Определение колориметрических характеристик цветовых зон проводится по стандартной процедуре: термоиндикаторное покрытие фотографируется на цифровой носитель, на цифровой фотографии

выделяются однородные зоны (с заданным порогом чувствительности) и определяются цифровые значения этих цветовых зон. Для получения колориметрических характеристик [3] образцы цветовых зон фотографируются цифровой камерой в присутствии цветовых стандартов системы RGB с соблюдением стандартов наблюдения МКО и освещением стандартным источником и обрабатываются на компьютере с использованием программы Adobe Photoshop. Однако в связи с тем, что термоиндикаторное покрытие имеет сложную мелкокристаллическую структуру, цвет покрытия неоднороден. Для каждой цветовой зоны определяются наиболее характерные оттенки цвета и их цветовые характеристики. Численные характеристики

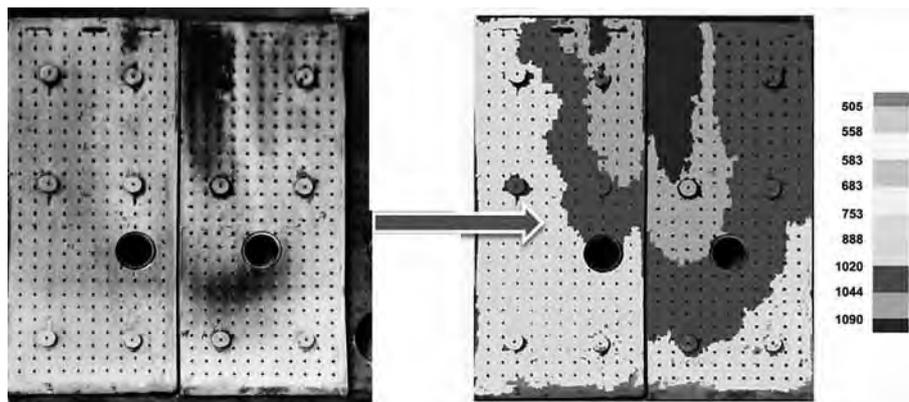


Рис. 2. Обработанный и необработанный вариант результата эксперимента

каждой цветовой зоны определяются некоторым интервалом, определенным статистически по 20 точкам для каждой цветовой зоны. После набора статистики по каждой цветовой зоне, определяется среднее значение цветовых характеристик, которому соответствует цвет в системе RGB, принятой за основу в цифровой фотографии и компьютерной графике.

Полученные величины цветовых характеристик послужили основой для базы данных, которая была скомпонована в «Атлас цветových зон термоиндикаторных красок типа ТК».

На сегодняшний день расшифровка температурных полей проводится на компьютере в автоматизированном режиме по цифровой фотографии термопокрытия после эксперимента. Усовершенствованный компьютерный метод расшифровки показаний термокрасок по цифровой фотографии поверхности с применением атласа используется в испытаниях элементов авиадвигателя.

Целью компьютерной обработки результатов эксперимента является изображение исследуемой поверхности с нанесенными на нее контрастными цветовыми зонами, соответствующими различным температурам перехода. Для этого термоиндикаторное покрытие фотографируется на цифровой носитель. Оператор обрабатывает изображение, меняя его яркость и контрастность таким образом, чтобы цветовые зоны были четко различимы, и отмечает приблизительное местоположение цветовых зон. Затем выделяется пиксель изображения, имеющий характерный для данной цветовой зоны цвет, программа сравнивает цветовые ко-

ординаты  $r'$ ,  $g'$  и  $b'$  близлежащих пикселей и автоматически выделяет зону, состоящую из пикселей, координаты которых отличаются от координат выбранного пикселя на величину, небольшую значения параметра  $t$ , называемого допуском и задаваемого оператором вручную, исходя из качества изображения и чистоты поверхности с термоиндикаторным покрытием. Затем выделенная зона заливается цветом, определенным цветовым атласом, после заливки всех цветовых зон получается желаемый результат (рис. 2). Данный метод отработывался при проведении испытаний элементов камер сгорания на различных материалах.

Поскольку такой метод предусматривает расшифровку температурных полей по цифровой фотографии, необходимо рассмотреть аппаратуру для качественной съемки. На данный момент в ЦИАМ для этих целей используется цифровой фотоаппарат Canon EOS 5D Mark II. Однако такая съемка поверхности имеет существенные ограничения, а именно:

- фотографирование поверхности фотоаппаратом возможно только после разборки двигателя;
- невозможно фотографирование в труднодоступных местах;
- качественная расшифровка возможна лишь тогда, когда поверхность объекта плоская или близка к плоской. В противном случае искажения освещения на поверхности приводят к ошибкам в расшифровке.

Для преодоления этих ограничений были рассмотрены имеющиеся методы неразрушающего визуально-оптического контроля, которые широко используются для оценки технического состояния авиадвигателей в процессе их обслуживания на земле, в частности, использование гибких видеоэндоскопов.

В ЦИАМ был проведен ряд экспериментов, подтверждающих целесообразность применения промышленного видеоэндоскопа OLYMUS IPLEX FX в качестве фотографирующей техники при исследовании температурных полей с помощью термокрасок. В первую очередь были сделаны выводы о необходимости проведения аттестации процедуры съемки термоиндикаторных покрытий с помощью видеоэндоскопа, поскольку разрешающая способность последнего существенно меньше показателей фотоаппарата, который используется для фотографирования термоиндикаторных покрытий в настоящее время.

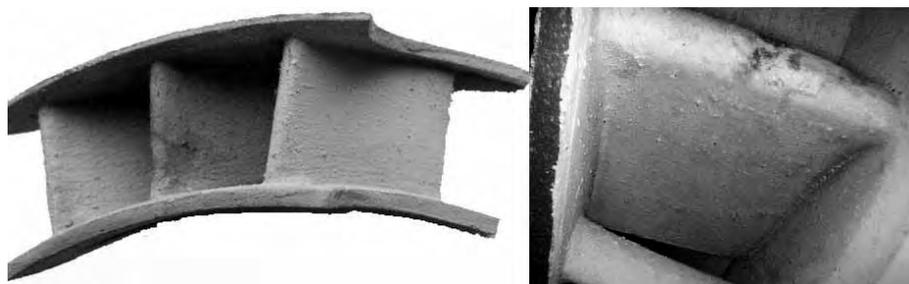


Рис. 3. Съемка термопокрытий в труднодоступных местах

На рис. 3 представлены результаты съемки термопокры-

тия на экспериментальном керамическом сегменте соплового аппарата в труднодоступных местах. На рисунке слева показан общий вид сегмента, полученный с помощью фотоаппарата, а справа — фотография труднодоступного места внутри сегмента, полученная с помощью видео-эндоскопа IPLEX FX.

Кроме того, была рассмотрена возможность расшифровки термopокpытий, загрязненных во время испытаний копотью, ржавчиной и маслом. В настоящее время очистка поверхностей производится вручную с помощью резиновых канцелярских ластиков, однако при удаленной съемке необходимо было также разработать метод удаленной очистки. Для очищения с помощью эндоскопа нужны приспособления для ластика и кисточки, чтобы убирать остатки резины после стирания. Было решено для обеих целей использовать имеющийся вспомогательный инструмент ExternalRetrievalTool (alligator type) ERT-218-A (рис. 4).

ERT-218-A захватывает ластик или кисточку зажимом типа «крокодил» (на рис. 4 для неподвижности ластика также закреплен клейкой лентой), крепится к направляющей трубке зонда специальными зажимами и представляет собой неподвижное продолжение направляющей трубки и секции изгиба, которое можно перемещать вместе с трубкой, проталкивая всю конструкцию вперед или назад. Была выработана методика очистки поверхности (здесь и в последующих экспериментах загрязнения моделировались нанесением слоя графита на поверхность): поверхность осматривается, оценивается масштаб и степень загрязнения; проводится очистка ластиком, поверхность повторно осматривается; при необходимости по усмотрению оператора трубка вынимается, меняется ластик, проводится дальнейшая обработка поверхности; направляющая трубка зонда вынимается, ластик заменяется

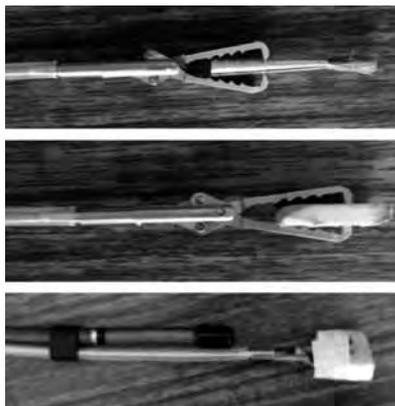


Рис. 4. ERT-218-A с кисточкой, ластиком, прикрепленные к направляющей трубке

кисточкой, убираются остатки резины; поверхность фотографируется, изображение обрабатывается. Ряд экспериментов показали, что при незначительных загрязнениях такая процедура очистки практически идентична ручной обработке поверхности. В случаях же очень сильного загрязнения методика уступает ручной очистке.

Очевидно, что эндоскоп в виду условий использования снимает покрытия с неудобных позиций: объектив часто находится под углом к поверхности или на очень близком расстоянии от нее. При этом даже небольшие по площади образцы (12 см<sup>2</sup>) удается снять видеозондом лишь фрагментарно. Это приводит к необходимости разработки ПО для панорамной «склейки» отдельных фрагментов изображений термopокpытия для получения качественной развертки исследуемой поверхности с целью дальнейшей расшифровки температурного поля.

Как правило, широкодоступное панорамное ПО использует достаточно узкоспециализированную модель и не может быть использовано в интересующей нас области. Поэтому необходимо разработать специализированное ПО, позволяющее решать выявленную проблему.

Суть метода состоит в следующем: на изображении выделяются несколько опорных точек. Для каждой из этих точек задается ее положение на эскизе развертки и далее изображение деформируется таким образом, чтобы точки приняли это положение. Использование дополнительных процедур позволяет получить достаточно качественное «плоское» общее изображение исследуемой поверхности.

На данный момент в ЦИАМ разработаны основы метода формирования совокупного изображения поверхности цилиндрических объектов из фрагментов изображений термоиндикаторных покрытий. Сформулирован алгоритм, включающий привязку фрагментов изображения к эскизу общей развертки поверхности, устранение геометрических и оптических искажений и объединение нормализованных фрагментов изображений поверхности в полное. Пример устранения искажений представлен на рис. 5.

После устранения искажений фрагменты изображения собираются в единое целое (рис. 6)

#### Заключение

Таким образом, предложенный метод является еще одним важным шагом в автоматизации расшифровки температурного поля поверхности элементов ГТД, в том числе имеющих сложную конфигурацию. Следует отметить, что данный метод в настоящий момент не является окончательным и будет совершенствоваться для получения максимально точного

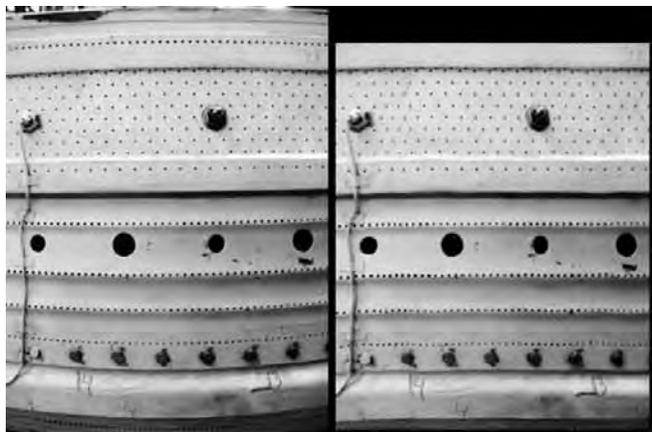


Рис. 5. Результат исправления искажений для формирования совокупного изображения поверхности

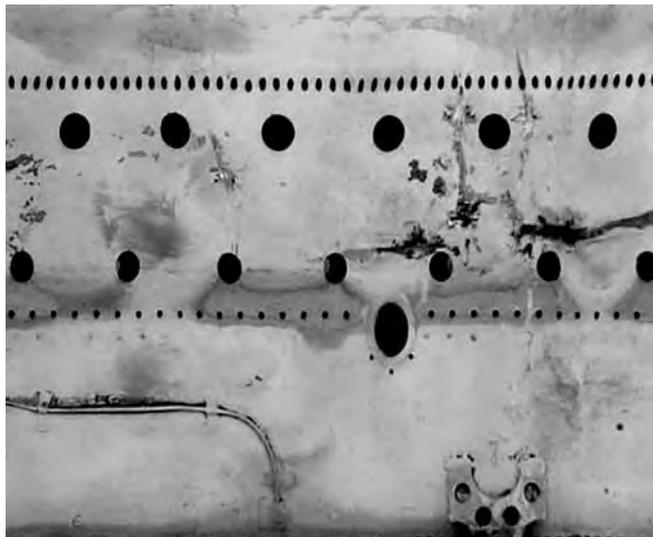


Рис.6. «Сшитый» фрагмент поверхности камеры сгорания

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).