

УДК 536.3

С.В. Воробьев

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия,
11116, Москва, Авиамоторная ул., 2, E-mail: vorobyev@rtc.ciam.ru*

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В СОПЛАХ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается способ визуализация картины сверхзвукового течения в сопле с помощью тепловизионной системы по изменению распределения температуры поверхности вследствие теплообмена с газовым потоком. Регистрация излучения осуществлялась с помощью коротковолновой тепловизионной системой АГА-782, работающая в диапазоне измерения длин волн $\Delta\lambda=2,0—5,6$ мкм. Для увеличения контраста излучения рассматривается возможность дополнительного подвода или отвода тепла от исследуемой поверхности, что позволит более информативно проводить визуализацию газового потока по термоизображения.

ТЕПЛОВИЗОР, ТЕПЛООБМЕН, СОПЛО

ВВЕДЕНИЕ

Тепловизионные методы исследования, диагностики и контроля основываются на теории теплопередачи и теплового излучения, материаловедении, аэрогазодинамики, устройстве оптикоэлектронных приборов и обработки полученных данных. Максимальная эффективность возможна при совместном применении различных контактных и бесконтактных методов. Тепловизионная техника позволяет получать распределение энергетической яркости B , по которой возможно определить полную тепловую картину объекта без установки дополнительных термодатчиков, предупреждать нестандартные и аварийные ситуации, связанные с перегревом во время проведения эксперимента. Развитие таких бесконтактных методов исследования в аэродинамическом эксперименте, как PIV (partition image velocimetry) и теневые, позволяет решать множество задач по визуализации. Однако установка оборудования для теневой съемки на газодинамических стендах часто затруднительна из-за сложности монтажа оборудования, его обслуживания и настройки под разные виды испытаний. Тепловизионный метод, представленный в данной работе, позволяет визуализировать газовый поток, определять положение скачков уплотнения, получать картину течения, зоны перехода от ламинарного режима течения в турбулентное по тепловому излучению от поверхности объекта, в том числе и крупномасштабных. Визуализация потока осуществляется по темпу изменения энергетической яркости излучения исследуемых поверхностей объекта, обтекаемых газовым потоком, с использованием тепловизионной системы АГА-782. Анализ экспериментальных данных проводится с помощью специализированного программного обеспечения “Термо”. В результате обработки определяется влияние потока на исследуемую поверхность с учетом влияния оптических характеристик газового потока, других источников излучения и неоднородностей

температурного поля поверхности измеряемого объекта, связанных с наличием скрытых дефектов и особенностей конструкции.

МЕТОДИКА ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Выбор и подготовка исследуемой поверхности

Особенностью тепловизионной системы является то, что она не воздействует на объекты измерения, позволяет фиксировать распределение излучения как от поверхности исследуемого непрозрачного объекта тонкого (толщиной от 1 до 3 микрон) слоя, так и газового потока, частично поглощающего излучение. Выбор поверхности для термометрирования производится исходя из информативности и наибольшего интереса с точки зрения исследователя, а также оптической видимости объекта. Подготовка поверхности заключается в зачёрнении исследуемой поверхности, например лаком КО 815 в смеси с графитовой пудрой с целью равномерного распределения и увеличения коэффициента излучения. На металлические поверхности желательно нанести теплоизолирующие покрытия, что сократит время выхода на режим термостатирования и улучшит визуализацию течения вследствие уменьшения теплоотвода от поверхности и внутреннего теплообмена.

Влияние неоднородности температурного поля поверхности измеряемого объекта, связанное с наличием скрытых дефектов, неравномерной степенью черноты и особенностей конструкции необходимо учитывать в дальнейшей обработке, это можно сделать при остывании предварительно равномерно нагретого объекта или наоборот, при нагреве. Глубина и размеры дефекта определяют амплитуду температурного сигнала над дефектом и время его выявления [1]

Выбор дополнительного оборудования.

Дополнительное оборудование для тепловизионной системы предназначено для обеспечения безопасности системы и оператора, а также проведения измерений в нестандартных условиях. Для защиты тепловизора в условиях повышенных перепадов давлений и температур необходимо использовать охлаждаемые или неохлаждаемые защитные иллюминаторы различных типов. В случае измерения высоких температур, а также сред с селективными поглощательными свойствами в потоке следует предварительно определить диапазон измеряемого излучения и подобрать спектральную характеристику тепловизионной системы с дополнительным оборудованием и фильтрами таким образом, чтобы на приемное устройство тепловизора попадало необходимое количество излучения. При визировании тепловизора возможно использование системы, состоящей из одного или нескольких зеркал. В экспериментах, где разница температур на исследуемой поверхности вследствие теплообмена недостаточная для визуализации, с целью увеличения градиента температур целесообразно производить нагрев или охлаждение как потока, так и исследуемой поверхности. Например, при снижении чувствительности тепловизора в диапазоне низких температур, возможно применение равномерного подогрева исследуемой поверхности до рабочего диапазона работы тепловизора, что позволит улучшить качество визуализации. Кроме того, влияние излучения от менее нагретых поверхностей ниже, поэтому желательно использовать для исследования подогреваемую поверхность с высокой степенью черноты.

Настройка тепловизионной системы

После монтажа дополнительного оборудования необходимо навести тепловизор на исследуемый объект, провести окончательную настройку и проверку всей тепловизионной

системы с дополнительным оборудованием до и после эксперимента. Настройка производится по результатам калибровки на модели абсолютно черного тела и предполагаемой энергетической яркости излучения таким образом, чтобы регистрировать весь диапазон от объекта исследования. Для формирования серии опорных термоизображений, которые используются в последующей обработке, необходимо обеспечить обнаружение с заданной достоверностью при термостатировании без потока газа неоднородности излучения от исследуемой поверхности, связанные с внешними и внутренними дефектами в материале деталей, неравномерным распределением излучательной способности и температуры на поверхности, а также других источников излучения.

Привязка двумерного термоизображения к поверхности объекта необходима для определения расположения в пространстве, идентификация размеров и формы зон изменения излучения. Привязку возможно провести до эксперимента, применяя мерные шаблоны с известными геометрическими характеристиками и располагая их на исследуемой поверхности. В случае возможного перемещения объекта во время эксперимента целесообразно дополнительно разместить на его поверхности несколько маркеров или использовать элементы конструкции (швы, заклепки, дефекты и пр.), по которым возможно идентифицировать в пространстве положение явлений, регистрируемые тепловизором на поверхности объекта.

Для количественной оценки достоверности обнаружения, идентификации и распознавания используем критерий Джонсона [2]. Его суть состоит в выделении нескольких уровней восприятия изображения. Нижний – соответствует выделению размытого пятна, приблизительно указывающего на область обнаруженного изменения излучения. Высший уровень соответствует точному распознаванию и определению геометрических размеров зоны с изменением излучения. Между этими уровнями находится ряд промежуточных уровней восприятия. Распознавание структуры течения по изменению силы излучения, производится в результате обработке серии термоизображений. Частота регистрации и количество термоизображений зависит от объекта измерения и продолжительности эксперимента. Во время проведения испытания из-за воздействия потоком возможно изменение оптических характеристик объекта измерения и элементов системы вследствие загрязнения частицами сажи, пыли, обмерзания или выпадения влаги, поэтому необходимо проверить состояние тепловизионного оборудования после эксперимента.

В экспериментах с поглощающей промежуточной средой при обработке важно учитывать, какую долю в измеренное излучение по спектру вносит поток, а какую поверхность. Возможно использование при обработке данные, полученные от источников опорного излучения с известными температурой поверхности и излучательной способностью.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ

Отработка метода проводилась на модели плоского сопла с поворотом сверхзвуковых створок [3]. Нижняя створка устанавливалась параллельно оси потока, а верхняя под углом 28° . Целью было визуализировать течение у боковых стенок и определять зону присоединения газовой струи к верхней сверхзвуковой створке при увеличении перепада давления в сопле.

На трубопровод 1, по которому течет поток чистого холодного воздуха, устанавливается исследуемая модель плоского сопла 2. Боковые стенки сопла изготовлены из металлических пластин, толщиной 7 мм, и на одну сторону 3 нанесена сажемаслянная краска, а противоположная 4 нагревается галогеновым излучателем 5, установленным перпендикулярно на небольшом расстоянии (35-40 мм) снаружи сопла. Во время эксперимента поток газа, протекающий через модель сопла 2 в систему выхлопа 6,

охлаждает стенку 4, а тепловое распределение поверхности регистрируется с помощью тепловизора 7 и блока управления 8 на компьютер с платой АЦП 9.

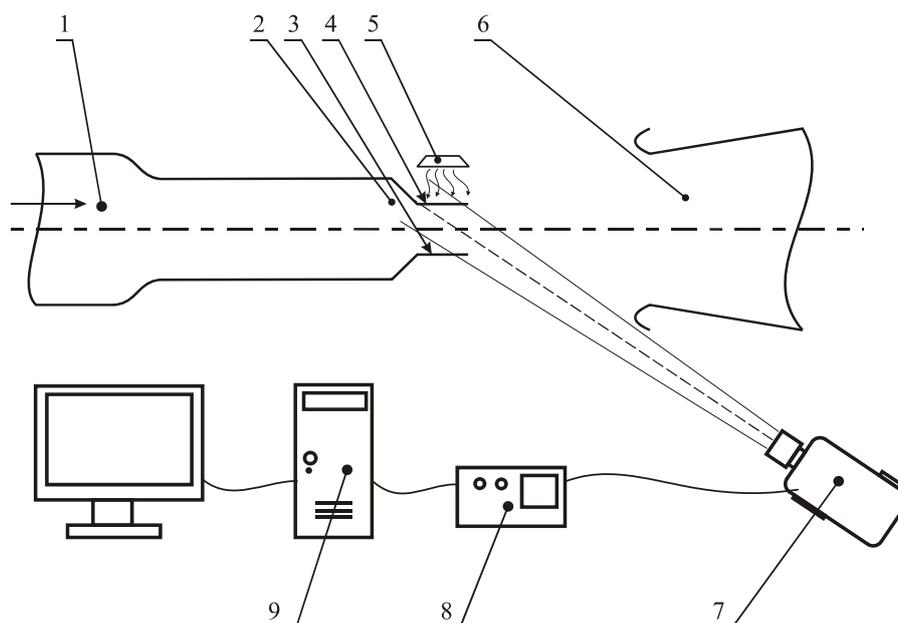


Рис. 1. Схема установки тепловизионного оборудования для визуализации потока в плоском сопле.

По термоизображениям боковой стенки плоского сопла на рис. 2 возможно определить зоны отрыва потока во время эксперимента по понижению температуры в этих зонах. На рис. 2а показано термоизображение, где нет присоединения струи к верхней створке при степени понижения давления в сопле $\pi=2$. При повышении давления до $\pi=3,4$ происходит присоединение струи, что видно по линии границы струи на рис. 2б. Светлой области соответствует область пониженного давления.

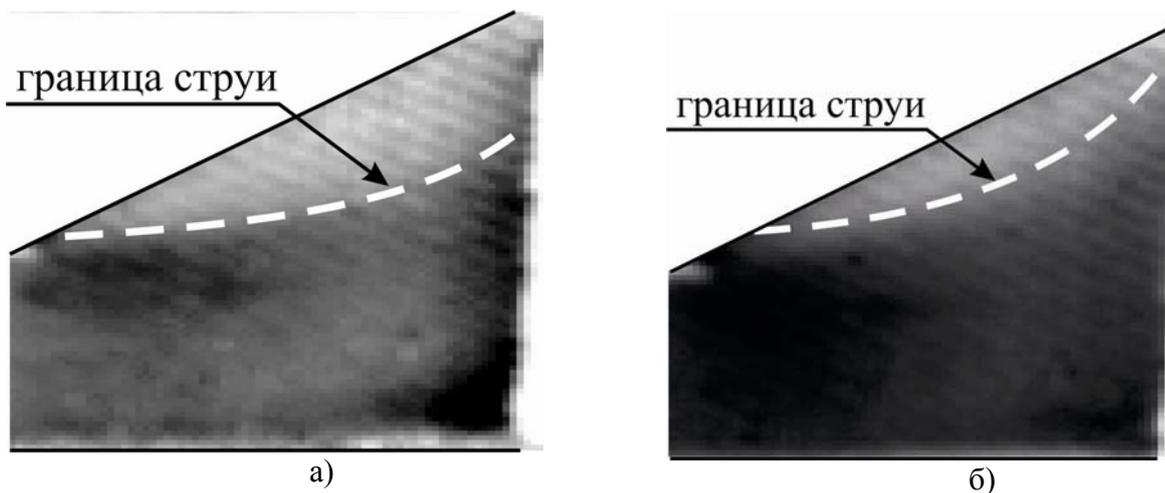


Рис. 2. Термоизображения плоского сопла при степени понижения давления в сопле $\pi=2$ без присоединения струи к верхней створке а) и при $\pi=3,4$ с прилипанием струи б).

По термоизображениям можно качественно определить зоны повышенного и пониженного статического давления и температуры, но для количественной оценки необходима совместная обработка с данными распределения статического давления по исследуемой поверхности сопла, которые возможно получить контактными методами с применением датчиков давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным преимуществом бесконтактных методов исследования в аэродинамическом эксперименте – это отсутствие влияния на исследуемые объекты и явления системой измерения.

В данной работе представлена методика визуализации течения потока газа с помощью тепловизионной техники, а также результаты экспериментов на газодинамическом стенде по исследованию течения в плоском сопле.

В ряде экспериментов по термоизображениям возможно определять также текущее тепловое состояние объекта исследования, наличие неоднородностей, трещин, ребер жесткости, что позволяет проводить контроль во время испытаний и предотвратить аварийные ситуации. Применение тепловизионной техники в позволяет сократить время испытания вследствие меньшей инерционности по сравнению с контактными методами, а также повысить качество и информативность результатов исследования. С повышением градиента температур между поверхностью и потоком, визуализация по термоизображению позволяет более детально оценить особенности течения, однако при этом также возрастает влияние температурных неоднородностей, связанных с внутренними дефектами объекта наблюдения.

В дальнейшем возможен переход от качественной оценки к количественной, что связано с созданием математической модели обработки термоизображений с применением уравнений тепломассопереноса и ввода дополнительных данных от других средств измерений.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

π – степень понижения давления в сопле;

B – энергетическая яркость излучения, Вт/(см²·ср)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нестерук Д.А., Вавилов В.П.** Тепловой контроль и диагностика: Учебное пособие / Томск.: Издательство ТПУ, 2007.
2. **Ковалев А. А. Ковалев А.В.** Возможности тепловизионного метода неразрушающего контроля в решении антитеррористических задач // Специальная Техника. № 6. 2006.
3. **Воробьев С.В., Клестов Ю.М., Мышенков Е.В., Мышенкова Е.В.** Исследование способов отклонения вектора тяги в эжекторных и поворотных соплах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, №4 (3), с. 692–693

S.V. Vorobyev

Centre Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia,
111250, Moscow, Aviamotornaya st., 2, E-mail: vorobyev@rtc.ciam.ru

VISUALIZATION OF THE GAS FLOW IN THE NOZZLE WITH THE HELP OF THERMAL IMAGING EQUIPMENT

The paper describes a way to visualize the picture of a supersonic flow in the nozzle with a thermal imaging system to modify the surface temperature due to heat exchange with the gas flow. The registration of radiation was carried out using short-wave imaging system AGA-782, working in the measuring range of wavelengths $\delta\lambda=2,0$ -of 5.6 microns. To increase contrast radiation is considered the possibility of additional supply or dissipation of heat from the surface, which will be more informative to carry out visualization of the gas flow on thermal imaging.

THERMOVISION, HEAT EXCHANGE, NOZZLE