

УДК 621.452.322, 681.786.24, 519.688, 004.93'12

## ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ГЕОМЕТРИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© М. П. Токарев<sup>1,2</sup>, А. В. Середкин<sup>1,2</sup>, М. Ю. Хребтов<sup>1,2</sup>,  
Н. П. Петкогло<sup>3</sup>, М. Ю. Вовк<sup>3</sup>, Л. М. Чикишев<sup>1,2</sup>, В. М. Дулин<sup>1,2</sup>,  
Д. М. Маркович<sup>1,2</sup>, Е. Ю. Марчуков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки,  
129301, Москва, ул. Касаткина, 13

E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

Современная авиационная промышленность решает задачу разработки многофункциональных двигателей, способных к полёту как на дозвуковых скоростях, так и на сверхзвуковых. Важной частью двигателей является сопло переменного сечения, которое позволяет изменять геометрию выходной части двигателя и, следовательно, его технические характеристики. В данной работе рассмотрен оптический бесконтактный метод восстановления формы сопла, основанный на компьютерном зрении. Для реконструкции используются данные, зарегистрированные двумя оптическими трёхмерными регистраторами, направленными на внутреннюю часть сопла во время наземных испытаний работы двигателя. Диагностика осложняется наличием горячей струи на пути обзора датчиков, изменением яркости свечения сопла в зависимости от режима, а также интенсивными механическими вибрациями. Выполненные стендовые испытания подтвердили работоспособность предложенного метода. По их результатам в режиме малого газа стандартное отклонение диагностированных диаметров выходного и критического сечений для каждого кадра не превышало 0,3 % от соответствующих размеров. Данные, полученные в результате подобной диагностики, могут учитываться при модернизации выходного устройства двигателя и системы управления тягой газотурбинного двигателя.

*Ключевые слова:* геометрия выходного устройства ГТД, наземные испытания, оптическая диагностика, 3D-сканирование, стереозрение, стереореконструкция.

DOI: 10.15372/AUT20190612

**Введение.** В авиационной промышленности некоторые функциональные параметры турбореактивных двигателей проверяются во время наземных испытаний. Примером является форма критического и выходного сечений выходного устройства (сопла), которая влияет на характеристики тяги турбореактивных двигателей с регулируемым соплом (РС) [1, 2]. В настоящее время для измерения геометрии сопла используются механические датчики обратной связи, закреплённые по периметру критического сечения сопла. Они позволяют оценить форму сопла по нескольким точкам, но имеют ограничения по количеству размещаемых датчиков и точности измерений.

Диагностика геометрических параметров оптическими методами широко применяется для измерения деформации, автоматического контроля качества, 3D-сканирования для быстрого прототипирования и др. [3, 4]. Диагностика геометрии РС во время работы двигателя сложнее по причинам сильных вибраций, кроме того, изменения светимости выходной струи для различных режимов работы, ограниченного угла обзора на внутрен-

ние элементы сопла, высокотемпературного градиента между окружающим воздухом и нестационарной струёй с выхлопными газами в направлении обзора оптических сенсоров.

Оптические измерения в газотурбинных двигателях представлены в ряде публикаций. Одно из последних исследований относится к измерению температуры на внутренней поверхности форсажной камеры двигателя с использованием термографических люминофоров [5]. При этом внимание обращается на сложные условия измерений с сильными акустическими вибрациями и оптическими неоднородностями. Измерения температуры были возможны только сразу после выключения форсажной камеры. Во время измерения лазерный источник излучения и детектор были защищены кожухами из стали с толстыми стенками.

В данной работе создан оптический бесконтактный метод реконструкции формы сопла, основанный на компьютерном зрении, что отличает его от методов, применяемых в настоящее время в индустрии. Описаны используемое оборудование, адаптированные алгоритмы стереорекострукции [6], разработанные методы регистрации параметров объекта по набору трёхмерных точек, результаты и анализ проведённых измерений на полномасштабном турбовентиляторном двигателе во время его испытаний.

**Система диагностики.** Разработанная система трёхмерной диагностики основана на принципе бинокулярного зрения и использует неструктурированное освещение с дополнительным контрастированием интересующей области на объекте исследования. Структурированное освещение не применялось, поскольку выходное устройство имеет подвижную конструкцию, а также из-за механических вибраций во время работы двигателя. Были использованы две связанные системы трёхмерного зрения, чтобы имелась возможность реконструировать всю область критического сечения. Оптические датчики размещались на безопасных для функционирования углах обзора по отношению к направлению выходной струи.

Реализуемая в данной работе оптическая система диагностики состоит из двух пар идентичных промышленных ПЗС-камер. С каждой стороны выходного сопла установлено по паре камер с разрешением Full HD с диагональю матрицы 1". Все камеры синхронизированы генератором импульсов с выходами, управляемыми с ПК для одновременной съёмки изображений. Во время испытаний частота съёмки составляла 5 Гц. На всех камерах использовались объективы с разрешением 5 Мп с фиксированным фокусным расстоянием 25 мм. Объективы оснащены оптическими полосовыми фильтрами с длиной волны 500 нм и полосой пропускания шириной 100 нм в целях подавления интенсивности излучения выходной струи в форсажном режиме. Для каждой пары оптических регистраторов две камеры, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга (15 см), работают как панорамный трёхмерный регистратор (рис. 1).

Оптические регистраторы направлены и сфокусированы на выходное устройство газотурбинного двигателя (ГТД). Каждая камера находилась в отдельном металлическом защитном термокожухе ТВК-07-В с водяным охлаждением производства АО «Эридан». Смотровое окно термокожуха дополнительно обдувалось сжатым воздухом, создавая эффект газовой тепловой завесы для охлаждения и защиты от пыли и аэрозоля керосина, находящихся в окружающей среде во время работы двигателя.

Расстояние от центра выходного сечения сопла до каждой стереопары равно 3,7 м (рис. 2). При расстоянии 4,4 м между двумя 3D-регистраторами, установленными по бокам эжектора, угол обзора относительно оси двигателя составлял около 48 градусов. Трёхмерные регистраторы были расположены на высоте оси двигателя, поэтому вертикальный угол наблюдения можно считать равным нулю.

Для оценки функции преобразования (проекции) глобальных координат на плоскость сенсора каждой камеры выполнялась калибровка оптической системы. Калибровочная мишень представляла собой окрашенный диск из стекла диаметром 0,5 м с нанесёнными

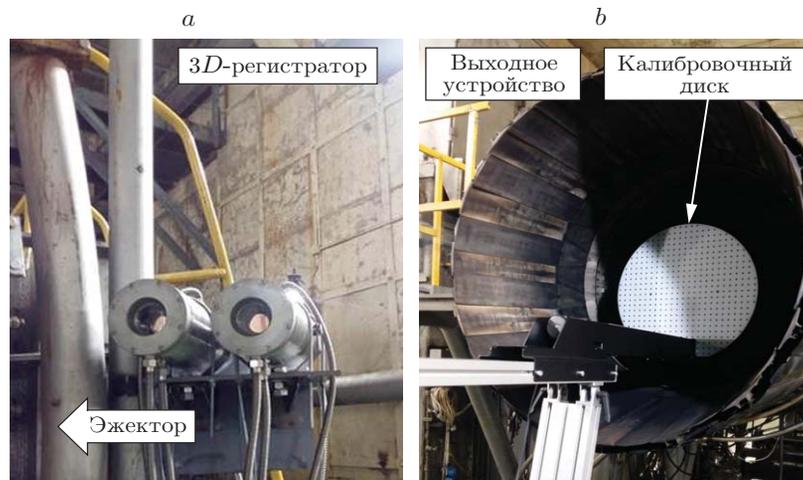


Рис. 1. Фотографии оборудования, установленного на стенде: *a* — один из 3D-регистраторов, закреплённый с правой стороны от эжектора, *b* — калибровочный диск внутри выходного устройства ГТД в области критического сечения во время процедуры калибровки

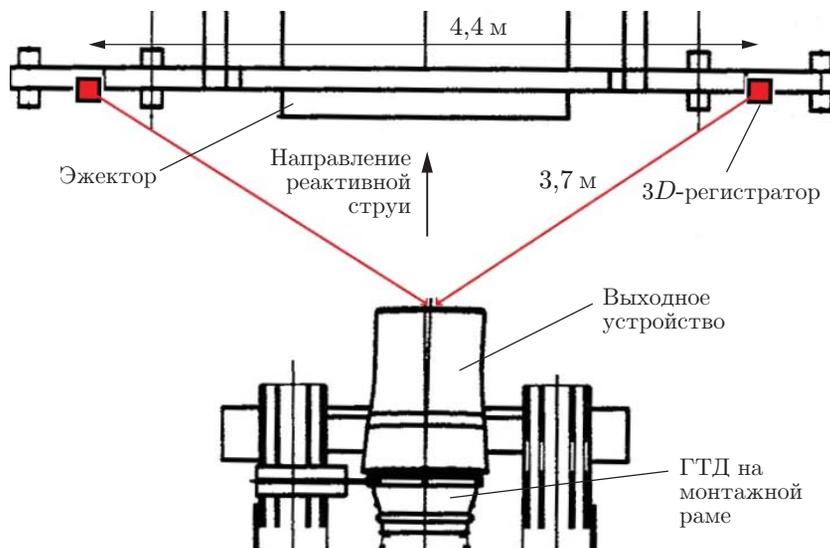


Рис. 2. Схематичное расположение 3D-регистраторов относительно выходного устройства ГТД (вид сверху)

кругами (маркерами), расположенными в декартовой решётке с шагом 20 мм. На мишени были выполнены два маркера большего диаметра, необходимые для определения положения начала системы глобальных координат по калибровочным изображениям правого и левого 3D-регистраторов. Калибровочная мишень находилась на моторизованном линейном координатном устройстве STANDA 8MT195X-540-4 с точностью позиционирования 2,5 мкм (см. рис. 1, *b*). Это позволило перемещать мишень вдоль осевого направления выходного устройства ГТД и полностью автоматизировать процесс регистрации изображений для уменьшения времени на калибровку оптической системы.

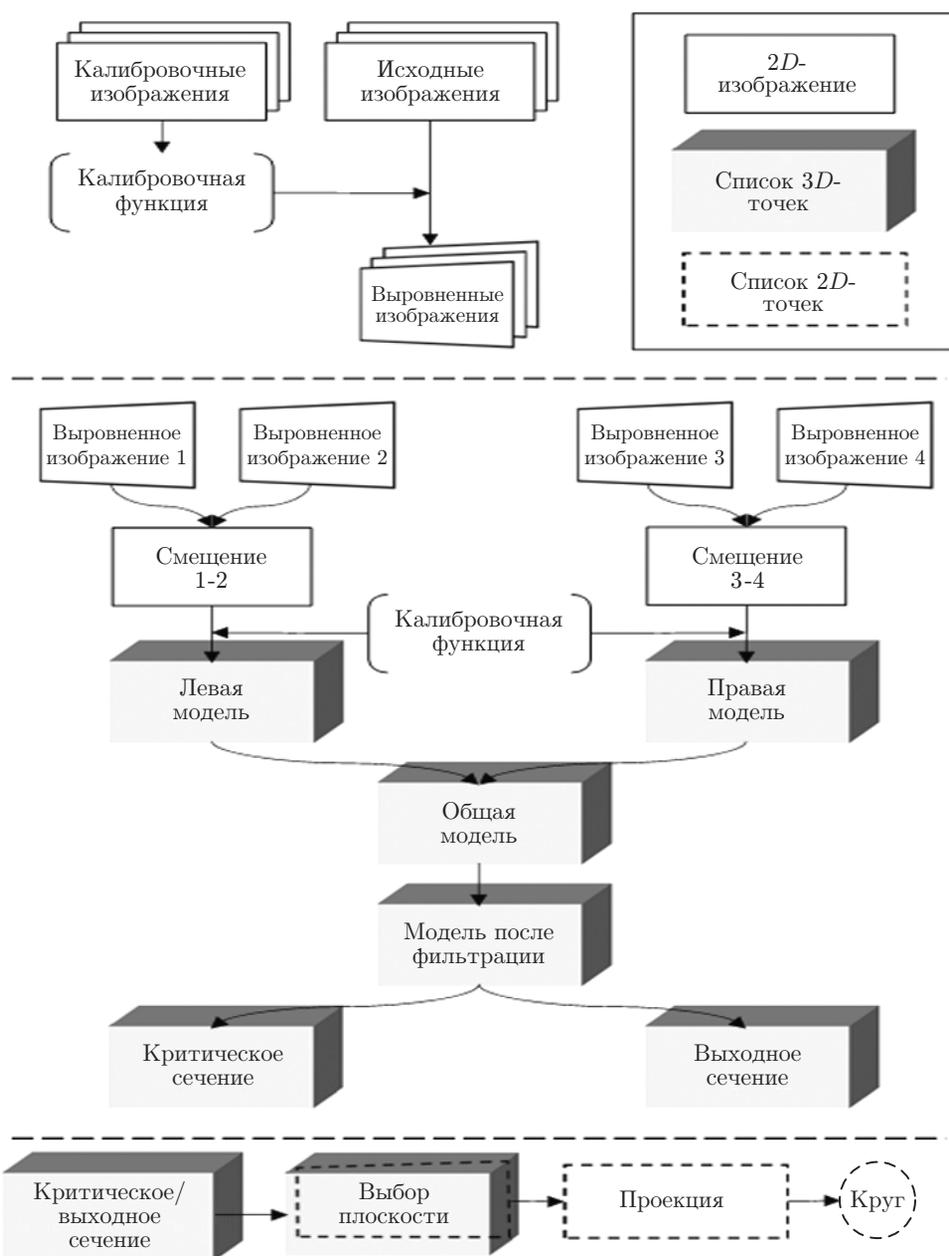


Рис. 3. Процесс обработки данных: построение выровненных стереоизображений и описание типов элементов диаграммы (вверху), диаграмма расчёта 3D-моделей критического и выходного сечений (в центре), оценка геометрических параметров сечений (внизу)

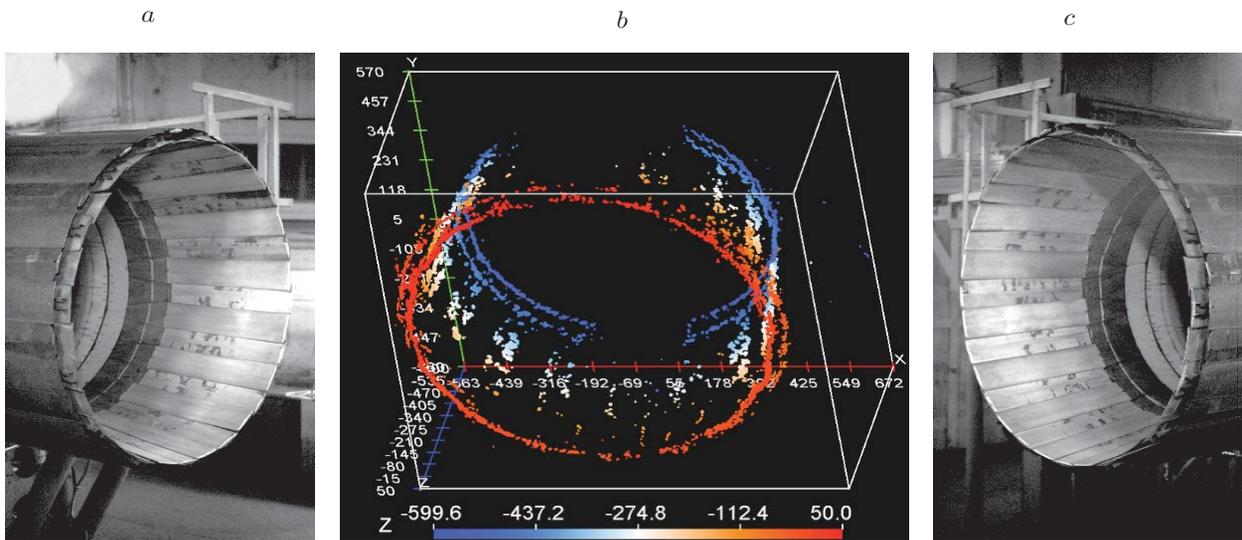


Рис. 4. Примеры полученных данных: *a* — исходное изображение выходного устройства с левой камеры левой стереопары, *b* — реконструированная 3D-модель видимой части выходного устройства в режиме малого газа с использованием алгоритма SGM, *c* — исходное изображение с правой камеры правой стереопары

**Использованные методы.** Вычисление геометрии сопла по изображениям происходило в автономном режиме. Полная схема обработки изображений представлена на рис. 3. Первая часть — калибровка камер, которая заключается в распознавании маркеров на калибровочных изображениях, сопоставлении их с известными координатами модели и получении математической модели проекции на матрицу камеры. В качестве модели была использована камера-обскура с учётом радиальной дисторсии [6]. Точность модели характеризовалась величиной среднеквадратичного отклонения между центрами маркеров, найденных на калибровочных изображениях, и центрами маркеров, предсказанных моделью. Типичные значения этой величины менее 0,3 пикселя для каждой камеры. Следующий шаг — получение выровненных изображений стереопары из исходных изображений с использованием модели проекции. Пара выровненных изображений стереопары имеет одинаковую  $y$ -координату для обоих снимков, что позволяет производить триангуляцию для построения карты глубины.

Стандартный способ реконструкции 3D-модели объекта по стереопаре — это сопоставление одних и тех же элементов объекта на изображениях стереопары для определения величины их сдвигового несоответствия (диспаратности), из которого однозначно вычисляется карта глубины объекта [7]. В работе использовались два алгоритма стереорекострукции: быстрый локальный алгоритм Block Matching и более надёжный, но медленный алгоритм Semi-Global Matching (SGM) [8].

По карте глубины и калибровочным данным составлялись трёхмерные модели сопла с левой и правой стереопарами (рис. 4, *b*). Трёхмерные модели хранились в виде списка координат точек. Далее правая и левая модели объединялись и в полученной модели фильтровался шум (см. рис. 3, внизу).

В отфильтрованной 3D-модели выделялись области с выходной частью сопла и с его критическим сечением. Дальнейшая регистрация сечений, аппроксимирующих проходные площади этих двух 3D-областей, проходила независимо по одинаковому алгоритму. Целевыми геометрическими параметрами служили площади критического и выходного се-

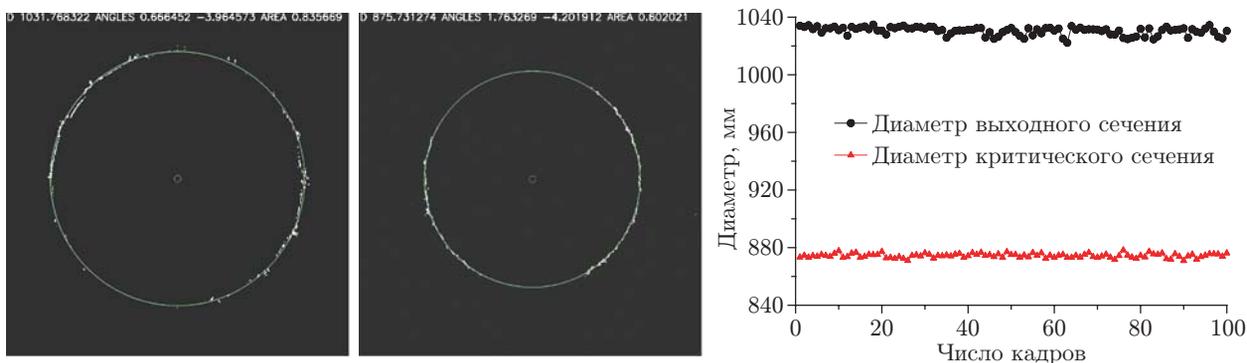


Рис. 5. Пример полученных геометрических параметров выходного устройства ГТД:  $a$  — выходное и  $b$  — критическое сечения в режиме малого газа,  $c$  — результат ста последовательных замеров диаметра выходного и критического сечений выходного устройства ГТД при работе в режиме малого газа

чений сопла. Хотя сечения имели довольно сложную форму, которая состояла из 16 створок и такого же количества уплотнительных проставок, прилегающих друг к другу, для устойчивой и надёжной идентификации сечений в данной работе они аппроксимировались окружностями. Радиус и положение окружности находились автоматически (рис. 5).

Последовательность обработки показана в нижней части рис. 3. Для уменьшения влияния шума и повышения стабильности работы алгоритма распознавание окружности в 3D-пространстве происходило в два этапа. Вначале определялась наиболее правдоподобная плоскость, в которой находилось сечение, а затем в плоскости вычислялись положение и размер окружности.

Для решения задач использовался итерационный метод RANSAC, оценивающий параметры математической модели по зашумлённому набору данных. Для нахождения плоскости применялась оценочная функция

$$J = \sum_i \max(\alpha - d(\bar{r}_i, \mathbf{P}), 0),$$

где  $d(\bar{r}_i, \mathbf{P})$  — расстояние между  $i$ -й точкой в наборе и случайной плоскостью  $\mathbf{P}$ , полученной в текущей выборке;  $\alpha$  — параметр, соответствующий половине толщины слоя, в котором выполнялся поиск плоскости. Затем все точки из этого слоя проецировались на найденную наилучшую плоскость. Положение центра  $(x, y)$  и радиус  $r$  окружности на полученной плоскости вычислялись по трём случайно выбранным точкам согласно системе уравнений

$$r^2 = (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2, \quad k = 1, 2, 3,$$

где  $(x_k, y_k)$  — координаты  $k$ -й выбранной случайной точки. Для нахождения окружности использовалась функция стоимости, оценивающая близость точек в наборе к окружности, построенной по текущей случайной выборке. Количество итераций алгоритма RANSAC было выбрано эмпирически, исходя из наблюдаемых результатов: 3000 итераций для нахождения плоскости и 400 итераций для нахождения окружности.

Описанные алгоритмы были реализованы в составе разработанного программного обеспечения для регистрации и обработки данных OptixM, которое было написано на языке C++. В программе использовались и другие библиотеки: OpenCV для задач, связанных с компьютерным зрением, Qt и OpenGL для реализации пользовательского интерфейса.

**Результаты и обсуждение.** Представленная система была использована для оптической диагностики геометрии РС турбовентиляторного двигателя в различных режимах работы, в том числе в режиме холостого хода, результаты диагностики которого представлены в данной работе. Полученные диаметры выходного сечения  $D_{\text{вых}} = 1030,5$  мм и критического сечения  $D_{\text{кр}} = 874,5$  мм для 100 измерений приведены на рис. 5, с. Разброс значений (среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ ), оценённых по каждому набору кадров, составлял 2,8 и 1,5 мм для выходного и критического сечений соответственно, что не превышало 0,3 %.

Конструкционно зона критического сечения выходного устройства не имела характерных контрастных особенностей текстуры на зарегистрированных изображениях, поэтому была промаркирована мелом в виде полосы шириной около 5 мм в плоскости критического сечения и хорошо видна на изображениях. Данная маркировка устойчиво держалась на поверхности во всех режимах работы ГТД и дополнительно обновлялась перед очередным запуском.

Основными источниками ошибок во время диагностики были механические вибрации опорных конструкций эжектора, которые передавались камерам в защитных кожухах, а также вибрации выходного устройства ГТД, закреплённого на раме. Интенсивные вибрации на максимальных режимах работы приводили к динамической и статической потерям калибровки оптической системы между 3D-регистраторами, а также, что наиболее критично, к снижению точности калибровки внутри стереопары в пределах одного 3D-регистратора. Для уменьшения влияния смещения регистраторов в процессе испытаний вследствие интенсивных механических вибраций калибровка оптической системы проводилась до и после испытаний. Помимо снижения точности калибровки виброперемещения создавали эффект размытия изображения. Для снижения этого нежелательного эффекта на камерах выставлялась короткая экспозиция между 10 мкс и 2 мс в зависимости от яркости выходной струи. Выполненные оценки показали, что вследствие таких вибраций на стенде изображения выходного устройства смещались на один пиксель в среднем за 10 мс. Это означает, что при экспозиции 2 мс смещение составляет около 0,2 пикселя и эффектом размытия можно пренебречь для данного и меньшего времени экспозиции.

**Заключение.** Разработана и испытана система бесконтактной оптической диагностики геометрии регулируемого сопла ГТД, благодаря которой была измерена площадь выходного и критического сечений во время наземных испытаний двигателя. Такие измерения используются для проверки фактических геометрических параметров регулируемого сопла ГТД, из которого истекает реактивная струя. Система оптической регистрации основана на трёхмерной стереоскопической визуализации с неструктурированной подсветкой и алгоритмах машинного зрения.

Основным источником ошибок в эксперименте были механические вибрации, что приводило к снижению точности калибровки оптической системы и размытию изображений. В худшем случае вибрация приводила к потере синхронизации стереопары и нарушению калибровки. Для этого калибровки выполнялись до и после эксперимента. Основная рекомендация по предотвращению нарушения калибровки — использование вибропоглощающих креплений для камер. Результаты трёхмерной оптической диагностики, представленные в данном исследовании, относятся к измерениям геометрических параметров сопла при работе двигателя в режиме малого газа. Разброс значений, оценённых по каждому набору кадров, не превышал 0,3 %, что подтверждает возможность использования метода измерений для анализа изменения диаметра выходного и критического сечений сопла с приемлемой точностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. М.: Машиностроение, 2008. 365 с.
2. **Нечаев Ю. Н.** Выходные сопла воздушно-реактивных двигателей. М.: Типолитография ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского, 1961. 84 с.
3. **Chen F., Brown G. M., Song M.** Overview of 3-D shape measurement using optical methods // Opt. Eng. 2000. **39**, N 1. P. 10–23.
4. **Zitova B., Flusser J.** Image registration methods: A survey // Image Vis. Comput. 2003. **21**, N 11. P. 977–1000.
5. **Seyfried H., Richter M., Aldén M., Schmidt H.** Laser-induced phosphorescence for surface thermometry in the afterburner of an aircraft engine // AIAA Journ. 2007. **45**, N 12. P. 2966–2971.
6. **Кэллер А., Брэдки Г.** Изучаем OpenCV 3. М.: ДМК Пресс, 2017. 826 с.
7. **Scharstein D., Szeliski R.** A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // Intern. Journ. Comput. Vis. 2002. **47**, N 1–3. P. 7–42.
8. **Hirschmuller H.** Stereo processing by semiglobal matching and mutual information // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 2008. **30**, N 2. P. 328–341.

*Поступила в редакцию 12.04.2019*

*После доработки 10.07.2019*

*Принята к публикации 22.07.2019*

---