

Возможность применения оптических методов измерения аэродинамических характеристик бокса наземного закрытого испытательного стенда с двигателем большой тяги

Асланян Э.В., Голенцов Д.А., Захаров Д.Л., Корнеев М.В., Логинова А.А., Лянзберг Ю.П., Маслов В.П., Минеев Б.И.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: dagolentsov@ciam.ru

Для измерения скорости на входе во входное устройство рекомендован метод PIV с измерением скоростей в двух продольных взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях с подачей оптических маркеров в этих плоскостях без засеивания всего потока воздуха, идущего через двигатель. Для измерения скорости в условиях крупномасштабного течения в испытательном боксе предложен времяпролетный метод, основанный на измерении времени пролета оптических маркеров, отслеживающих скорость потока, между двумя лазерными ножами, сформированными в двух поперечных сечениях бокса на известном расстоянии друг от друга. По результатам модельного эксперимента проведена оценка возможности применения метода в стендовых условиях. Предложены схема измерительной системы и конструкция устройства генерации одиночных оптических маркеров, засеиваемых в поток и двигающихся в потоке без проскальзывания.

Ключевые слова: испытательный стенд, измерение скорости, времяпролетный метод.

Possibility of using optical methods to measure aerodynamic characteristics in a chamber of an enclosed ground test bench with a high-thrust engine

Aslanyan E.V., Golentsov D.A., Zaharov D.L., Korneev M.V., Loginova A.A., Lianzberg J.P., Maslov V.P., Mineev B.I.

CIAM, Moscow

The PIV method is recommended to measure velocity at inlet of an air intake duct which measures velocities in two longitudinal mutually perpendicular diametrical planes with optical markers supplied in these planes without “sowing” the entire air flow going through the engine. To measure velocity in large-scale flow conditions in a test chamber, a time-of-flight method is proposed based on measuring the time of flight of optical markers that track the flow rate between two laser beams formed in two cross-sections of the chamber at a known distance from each other. The assessment was made regarding possibility of using this method in test bench conditions based on the results of a model experiment. The layout of the measuring system and the design of the device for generating single optical markers, inoculated into the flow and moving in the flow without slipping, are presented.

Keywords: test bench, velocity measurement, time-of-flight method.

Введение

Аэродинамические характеристики испытательного бокса наземного стенда оказывают существенное влияние на измеряемые параметры испытываемых двига-

телей. В частности, может существенно ухудшаться газодинамическая устойчивость двигателя, уменьшаться измеряемая сила от тяги. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость введения поправочного коэффициента к измеряемой силе и при его некоррект-

ном определении может в конечном итоге привести к несоответствию эксплуатационных характеристик двигателя, прошедшего приемо-сдаточные испытания, заявленным в техническом задании на его разработку. С учетом этого аэродинамические характеристики испытательных стендов нормируются отраслевым стандартом ОСТ 1 01021-93 «Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования» и подлежат исследованию при вводе стенда в эксплуатацию с последующими периодическими проверками.

При постановке на испытания двигателей с большей размерностью в бокс наземного испытательного стенда, спроектированного для двигателей меньшей размерности, возникают проблемы с обеспечением соответствия требованиям ОСТ 1 01021-93, предъявляемым к аэродинамическим характеристикам стенда. В частности, в настоящее время рассматривается вопрос о модернизации существующих стендов, которая позволила бы проводить испытания двигателя большей размерности, существенно превосходящего по тяге испытываемые сегодня двигатели. В таком случае потребуются более детальное исследование аэродинамических характеристик модернизируемых стендов и усовершенствованный, оперативный их контроль. При этом существующий метод измерений, базирующийся на монтаже датчиков в нескольких точках поперечного сечения бокса, на специально воздвигаемых штангах, недостаточно информативен из-за ограниченного количества точек измерения и отсутствия информации о направлении скорости потока. Кроме того, измерения, проводимые с помощью приемников давления, при малых скоростях в боксе (до 15 м/с) характеризуются достаточно большой погрешностью.

Эффективным средством повышения точности определения поправочного коэффициента к измеряемой силе от тяги двигателя, особенно при указанном выше подходе к испытаниям двигателя большой размерности, является использование нескольких методов, основанных на применении теоремы Эйлера к различным контрольным объемам. Однако все эти методы требуют достоверного измерения расхода воздуха через двигатель. На современных стендах используется, как правило, верхняя подвеска двигателя. В этом случае для измерения расхода воздуха применяются нестандартизованные, короткие, легкие входные устройства (ВУ) с существенно ограниченным препарированием по сравнению с требованиями ОСТ 1 02555-85 «Система измерения расхода воздуха с коллектором на входе авиационных ГТД при стендовых испытаниях. Общие требования». Поэтому крайне актуальной становится задача детального измерения поля скорости в мерном сечении расходомерного коллектора, являющегося частью ВУ.

С целью повышения точности определения аэродинамических характеристик бокса наземного испытательного стенда, влияния аэродинамики на измеряемую силу от тяги в настоящей статье рассматривается возможность применения оптических методов измерения параметров воздушного потока.

Условия применения оптических методов для измерения характеристик внешнего по отношению к двигателю течения в боксе и внутреннего, внутри ВУ, существенно отличаются. Внешнее течение характеризуется большими размерами (поперечное сечение бокса $(12...15) \times (12...15) \text{ м}^2$) и относительно невысокой скоростью (10...15 м/с). Размеры внутреннего течения заметно меньше ($\sim 10 \text{ м}^2$), а скорость на порядок больше, и необходима детальная информация о ее радиальном распределении, особенно в пристеночной области, где наблюдается большой градиент.

В обоих случаях одной из основных проблем применения оптических методов является засевание потока необходимыми частицами-метками. С одной стороны, концентрация частиц-меток должна быть достаточно высокой для обеспечения необходимого пространственно-временного разрешения измерений; с другой стороны, эти частицы, идущие внутрь двигателя, не должны влиять на его работу. Были проанализированы различные методы измерения.

Измерение поля скорости потока во внутреннем течении

Схема с поперечным лазерным ножом. Для детальных измерений распределения скорости во внутреннем течении предпочтительным является метод измерения PIV (particle image velocimetry).

Одним из распространенных вариантов схемы PIV является схема измерений продольной компоненты скорости потока в поперечном лазерном ноже. Принципиальная схема этого варианта измерительной системы с возможным размещением ее элементов вне и внутри испытательного бокса показана на рис. 1. В этой схеме лазерный нож формируется в поперечном сечении воздушной струи вблизи среза входного устройства. Лазер расположен вне испытательного бокса, и лазерный нож с помощью зеркала передается в область измерения через специальное окно в стенке бокса. В этой схеме используются две цифровые камеры, размещаемые внутри испытательного бокса, в специальных защитных герметичных кожухах, внутри которых создается микроклимат, необходимый для нормальной работы камер.

При использовании такой схемы регистрировать поле скорости во всем поперечном сечении входной струи не представляется возможным – энергии лазерного излучения, которую могут создавать импульсные

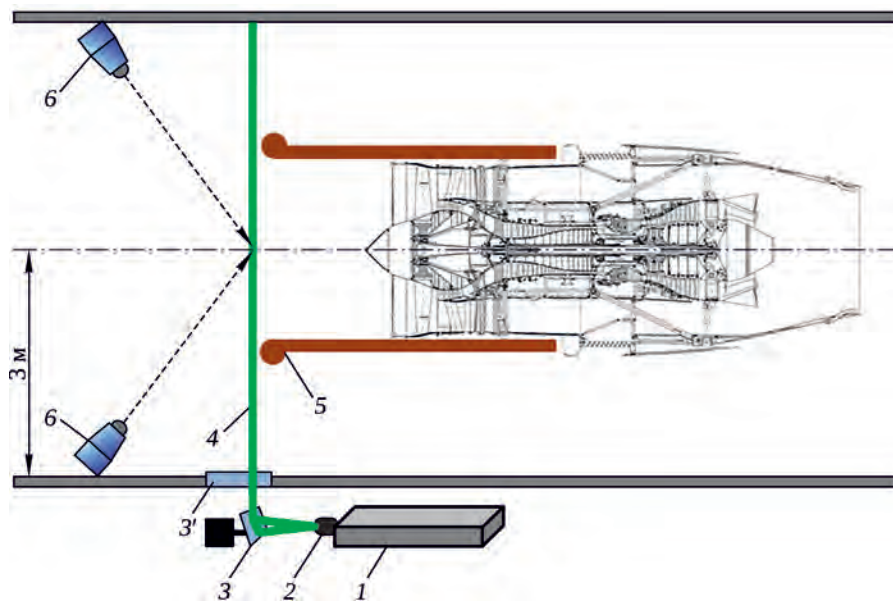


Рис. 1. Схема измерительной системы PIV для измерения продольной компоненты скорости в поперечном лазерном ноже: 1 – импульсный лазер; 2 – цилиндрическая линза с коллиматором; 3 – передающее зеркало, закрепленное на оси шагового двигателя; 3' – окно в стенке испытательного бокса; 4 – лазерный нож; 5 – входное устройство; 6 – цифровые камеры

лазеры современных коммерческих систем PIV, недостаточно. Энергия лазерного излучения, приходящаяся на единицу площади лазерного ножа, обратно пропорциональна его поперечному размеру. Опыт работы с имеющейся в ЦИАМ системой PIV, укомплектованной импульсным лазером с энергией 120 мДж в импульсе, показывает, что система позволяет регистрировать излучение, рассеянное частицами-маркерами размером менее 1 мкм, при ширине лазерного ножа 200...250 мм. Учитывая, что диаметр входного устройства может быть более 3 м, для организации лазерного ножа потребуются чрезвычайно мощный лазер, эксплуатация которого в условиях стенда нецелесообразна.

В этом случае возможно применение системы сканирования поперечного сечения входной струи. Зеркало 3 (см. рис. 1) можно закрепить на оси шагового двигателя, работа которого должна быть синхронизирована с работой лазера, и последовательно перемещать лазерный нож в различные области поперечного сечения ВУ. Например, при ширине лазерного ножа 200 мм и частоте работы импульсного лазера 4 Гц поле скорости размером 2 м можно измерить за 2,5 с. Если использовать более мощный лазер по сравнению с упомянутым выше, время можно сократить путем увеличения ширины лазерного ножа и, соответственно, уменьшением количества измерений для заданного размера измерительного сечения. Сфокусировать лазерный нож до толщины 1...1,5 мм на большом расстоянии от лазера возможно с использованием коллиматора.

Локальность измерений определяется используемыми цифровыми камерами. Камеры, входящие в состав используемой авторами системы, имеют размер матрицы

1024 × 1300 пикселей, т.е. 1,3 Мпк. При регистрации поля скорости размером 2 м с окном опроса (область, которой приписывается определенное значение скорости) 16 × 16 пк с 50%-м перекрытием окон опроса, локальность измерений составит 16 мм. Известны камеры для систем PIV с размером матрицы до 30 Мпк. Использование таких камер позволит повысить локальность измерений почти в пять раз, до 3 мм.

Следующим важным условием для работы измерительной системы PIV является качество запыления исследуемого потока. Как известно из работ [1; 2], для расчета скорости потока концентрация частиц должна быть такой, чтобы в одном окне опроса одновременно находилось несколько десятков частиц. При толщине лазерного ножа 1 мм и окне опроса 16 × 16 мм в 1 м³ воздуха должно содержаться порядка 2 · 10⁸ частиц. При объемном расходе воздуха 500...800 м³/с производительность генератора частиц должна быть не менее (1...2) · 10¹¹ частиц в секунду. Создание таких генераторов возможно, однако ввод такого количества частиц-маркеров в двигатель может сказаться на его работе.

Схема с продольным лазерным ножом. Рассмотрим другой распространенный вариант схемы PIV, в котором осевая компонента скорости потока измеряется в продольном лазерном ноже (рис. 2). В такой схеме лазерный нож формируется в направлении перпендикулярном плоскости входного сечения входного устройства и проходит по его диаметру. Для уменьшения толщины ножа в измерительной области также используется коллиматор. В отличие от традиционной схемы авторы настоящей статьи предлагают использовать одновременно две регистрирующие камеры: одна регист-

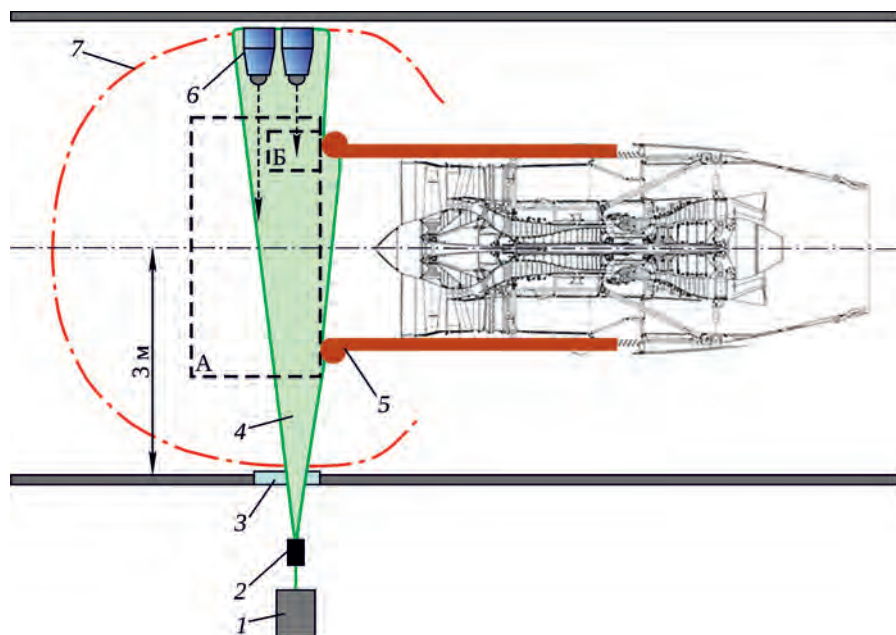


Рис. 2. Схема измерительной системы PIV для измерения продольной компоненты скорости в продольном лазерном ноже: 1 – импульсный лазер; 2 – цилиндрическая линза с коллиматором; 3 – окно в стенке испытательного бокса; 4 – лазерный нож; 5 – входное устройство; 6 – цифровые камеры; 7 – коллектор подачи частиц-маркеров

рирует картину течения вдоль всего диаметра входного устройства (область А на рис. 2), вторая – в области размером около 200 мм, расположенной вблизи края входного устройства (область Б на рис. 2), где необходимо высокое пространственное разрешение измерений из-за большого градиента скорости в этой области.

Данный вариант схемы проще в исполнении, не требует использования лазера высокой мощности, вполне подходит импульсный лазер мощностью 120 мДж. Кроме того, пространственного разрешения 16×16 мм вполне достаточно для основной области потока, это разрешение может быть обеспечено камерой с размером матрицы 1,3 Мпк. Разрешение в области течения, расположенной вблизи края входного устройства, можно обеспечить порядка $1,5 \times 1,5$ мм второй такой же камерой. В этой схеме не требуется засеивание частицами всего засасываемого двигателем воздуха, достаточно засеивать поток вблизи плоскости лазерного ножа. Для этой цели можно использовать специальный коллектор для подачи частиц-маркеров (см. рис. 2), разместив его в пилоне перед двигателем в плоскости лазерного ножа.

Для определения расхода воздуха через двигатель потребуется провести измерения скорости в двух взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях аналогично тому, как это делается в настоящее время с помощью гребенок приемников полного давления, которые в отличие от предложенной схемы устанавливаются в мерном сечении ВУ, где во всех точках поперечного сечения скорость течения направлена вдоль оси ВУ. В случае применения метода PIV регистрируется как продольная, так и радиальная ком-

поненты скорости, поэтому измерения можно проводить непосредственно перед входом в ВУ.

Отдельной проблемой является засеивание потока частицами-маркерами, которое не должно влиять на режимы работы двигателя и его состояние. В генераторах для создания частиц-маркеров в виде аэрозоля, как правило, используются горючие жидкости, например наиболее широко применяемая для этих целей жидкость DENS, которая имеет точку воспламенения 250°C . Поэтому для применения PIV для текущей задачи необходимо создание соответствующего генератора частиц-маркеров.

Измерение поля скорости потока во внешнем течении

Для измерения скорости в поперечном сечении бокса (размером $(12 \dots 15) \times (12 \dots 15) \text{ м}^2$) испытательного стенда авторами предложен времяпролетный метод измерения поля скорости потока, основанный на измерении времени пролета оптических маркеров, отслеживающих скорость потока, между двумя лазерными ножами, сформированными в двух поперечных сечениях бокса на известном расстоянии друг от друга. Для реализации этого метода предполагается условно разбить эти два сечения бокса на несколько десятков прямоугольных (квадратных) областей так, чтобы разбиение в обоих лазерных ножах было одинаково и области находились одна за другой. Напротив центра каждой такой пары областей размещается устройство для подачи частиц-маркеров. При этом генерируемые частицы

последовательно проходят сначала одну область, затем вторую. Устройства подачи могут располагаться либо на выравнивающей сетке за входной шахтой, либо на поворотных лопатках на выходе входной шахты, либо на специально установленных пилонах.

Для формирования лазерных ножей в двух поперечных сечениях бокса используются мощные диодные лазеры. С помощью высокоскоростной видеокамеры, направленной на лазерные плоскости, регистрируется оптический сигнал от частиц-маркеров. Каждой паре прямоугольных областей в плоскостях лазерных ножей соответствуют области на матрице видеокамеры. Таким образом, при прохождении частиц-маркеров, генерируемых по всему сечению бокса, через лазерные ножи их изображения фиксируются в различных точках матрицы. По положению изображений на матрице можно определить, через какую прямоугольную (квадратную) область поперечного сечения прошла частица-маркер, а по номерам кадров, на которых зафиксировано последовательное прохождение первого и второго лазерного ножа, и частоте кадров можно определить время пролета частицы между двумя ножами и, соответственно, скорость в этой области (V_i). Набрав необходимую статистику по некоторому количеству частиц, можно определить характеристики течения в этой области. Проинтегрировав значения средней скорости по всем прямоугольным (квадратным) областям, получаем величину объемного расхода воздуха через бокс. Также, сложив все скорости V_i и разделив эту величину на количество прямоугольных областей, получаем значение нормируемой среднemasсовой скорости воздушного потока в боксе.

Чтобы проанализировать особенности предложенного метода применительно к условиям бокса испытательного стенда, задача была разбита на несколько направлений:

1) разработка конструкции и экспериментальная отработка макета устройства генерации оптических маркеров, засеиваемых в поток и двигающихся в потоке без проскальзывания;

2) экспериментальная отработка предложенного метода на модельной установке в условиях течения небольшого масштаба, по сравнению с испытательным боксом;

3) оценка возможности применения времяпролетного метода в условиях течения большого масштаба, характерного для течений в испытательном боксе.

Предварительно в качестве оптических маркеров было предложено использовать воздушные шарики диаметром около 1 см, типа мыльных пузырей, создаваемых из специальной мыльной смеси. Движение частиц-маркеров такого типа, их скорость практически совпадают с движением и скоростью воздушного потока

(частицы-маркеры «вморожены» в поток). Генераторы частиц-маркеров такого типа производятся, например, фирмой LaVision для исследования течений достаточно большого размера (~1 м) с помощью метода PIV [3–10]. Однако для измерения скоростей в боксе стенда, предназначенного для испытаний авиационных двигателей, эти устройства не подходят, так как они предназначены для генерации пузырей в больших концентрациях, что необходимо для корректных измерений скорости с помощью PIV там, где используется корреляционный анализ. Большое количество пузырей в воздушном потоке стенда неприемлемо при испытаниях двигателя из-за возможного их влияния на его работу, поэтому метод PIV неприменим для условий течения в боксе больших размеров.

При использовании времяпролетного метода для измерения скорости потока в описанной выше постановке необходимо, чтобы генераторы, расположенные в различных областях поперечного сечения бокса, создавали единичные пузыри (оптические метки) в заданный момент времени. По этой причине была предложена принципиальная схема устройства для создания и подачи мыльных пузырей в воздушный поток (рис. 3). Принцип действия такого устройства заключается в формировании одиночного пузыря заданного размера за счет сдува «мыльной» пленки с кольцевой державки при подаче на нее струи воздуха в импульсном режиме. Генератор импульсов 1 вырабатывает электрические прямоугольные импульсы заданной длительности и скважности. При поступлении сигнала с генератора

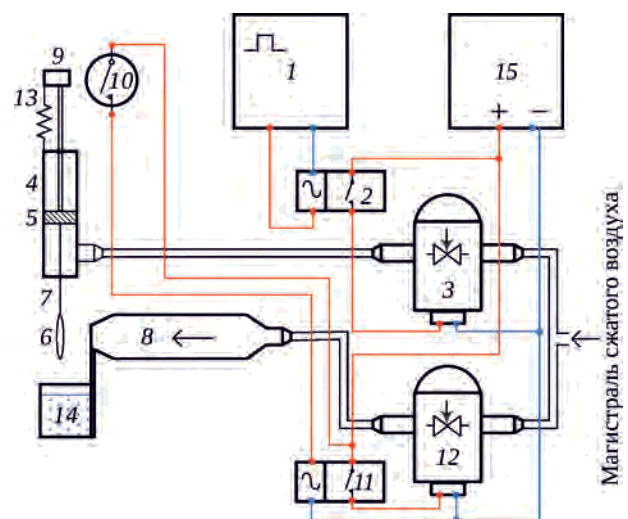


Рис. 3. Схема генератора мыльных пузырей и управления его работой:

1 – генератор импульсов; 2 – реле клапана; 3 – клапан; 4 – цилиндр генератора пузырей; 5 – поршень генератора пузырей; 6 – резиновое кольцо; 7 – шток; 8 – сопло генератора пузырей; 9 – постоянный магнит; 10 – геркон; 11 – реле; 12 – клапан; 13 – возвратная пружина; 14 – емкость с мыльным раствором; 15 – источник питания клапанов

на реле 2, управляющее электропитанием клапана 3, клапан открывается и подает воздух в цилиндр 4, поршень 5 поднимается под воздействием давления воздуха и выводит кольцо с мыльной пленкой 6, закрепленное на штоке 7, на ось сопла 8. В верхней части штока расположен постоянный магнит 9, который используется для замыкания контактов геркона 10 при подъеме штока в верхнее положение. При замыкании контактов геркона срабатывает реле 11, управляющее электропитанием клапана 12, клапан открывается и подает воздух через сопло на кольцо, при этом из кольца выдуваются пузыри.

После прохождения импульса реле 2 размыкается, клапан 3 перекрывает подачу воздуха в цилиндр, под действием пружины 13 поршень с кольцом опять опускается в емкость с мыльным раствором 14, прикрепленную к нижней стенке сопла. Контакты геркона размыкаются, и клапан 12 перекрывает подачу воздуха через сопло. Через заданное время, соответствующее скважности импульсов, генератор вырабатывает следующий импульс, и процесс выдува пузырей повторяется. Варьируя длительность импульсов и их скважность, можно подобрать такой режим работы генератора пузырей, когда за один цикл его работы будет выдваться только один пузырек.

Состав смеси для создания пузырей был подобран так, чтобы обеспечить образование достаточно долгоживущих пузырей и, наряду с этим, отсутствие мелких брызг на выходе генератора, двигающихся с большим проскальзыванием относительно движения воздуха и затрудняющих корректную обработку видеоизображений частиц-маркеров. В качестве жидкости была выбрана смесь жидкости Faigu с водой. Наиболее подходящим оказался 90-процентный водный раствор Faigu, который использовался в дальнейшем при отработке генератора и при проведении модельных экспериментов.

Экспериментальная отработка генератора пузырей позволила выбрать наиболее подходящие параметры генерации электрических импульсов для обеспечения однопузырькового режима. Длительность импульсов составила 0,5 с, скважность импульсов – 3 с. Характерный размер выдуваемых пузырей составлял около 1 см.

Проверка работоспособности предложенного метода измерения скорости проводилась на модельной установке, показанной на рис. 4. Для создания воздушного потока использовалась аэродинамическая установка с открытой рабочей частью. Воздушная струя выходила из сопла диаметром 200 мм с регулируемой начальной скоростью. В поперечном сечении струи формировались два лазерных ножа на расстоянии 680 мм от среза сопла и 240 мм друг от друга. Лазерные ножи формировались с помощью двух полупроводниковых лазеров

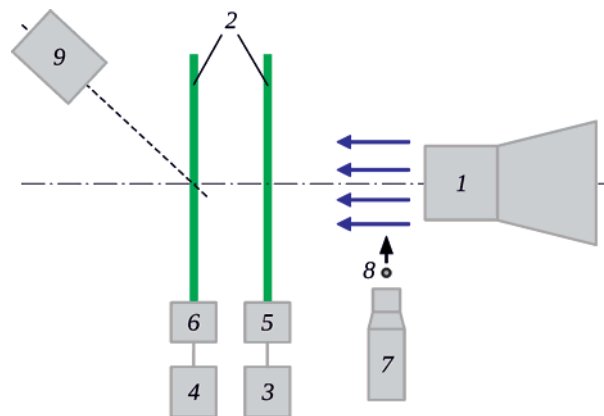


Рис. 4. Схема модельной установки для проверки работоспособности предложенного метода измерения скорости с помощью оптических маркеров – мыльных пузырей: 1 – сопло аэродинамической установки; 2 – лазерные ножи; 3, 4 – полупроводниковые лазеры; 5, 6 – цилиндрические линзы; 7 – генератор пузырей; 8 – мыльные пузыри; 9 – высокоскоростная видеокамера

мощностью 1 Вт и цилиндрических линз. Толщина ножа в области измерения составляла примерно 2 мм, угол раскрытия луча $\sim 100^\circ$, что обеспечило ширину ножа около 1,5 м. Генератор пузырей располагался на расстоянии 200 мм от среза сопла и на расстоянии 300 мм от оси струи. Пузыри из генератора подавались в струю перпендикулярно оси потока. Попадая в ядро струи, пузыри приобретали осевую компоненту скорости, соответствующую скорости потока, и последовательно пересекали две плоскости лазерного ножа. Для видеорегистрации пузырей (бликов отраженного от поверхности пузырей лазерного излучения) исполь-

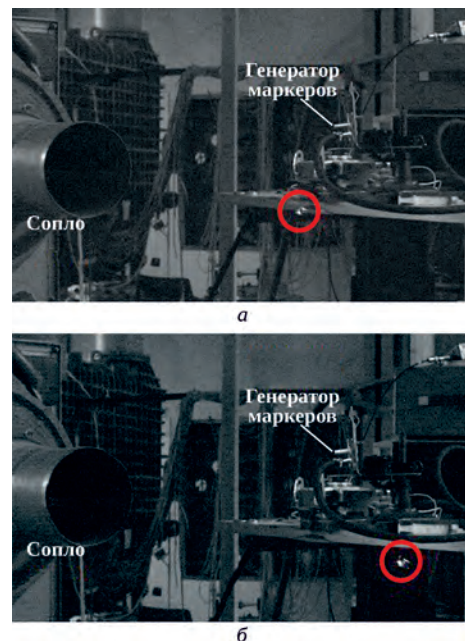


Рис. 5. Кадры видеосъемки при прохождении частицы-маркера (отмечен красным кружком) через первый (а) и второй (б) лазерные ножи

зовалась высокоскоростная видеокамера с размером матрицы 35×22 мм и разрешением 1280×800 пк. Камера располагалась на расстоянии 1,5 м от плоскости первого лазерного ножа под углом 45° к оси струи. Регистрация производилась с частотой кадров 1 кГц и временем экспозиции 1 мс. На рис. 5 показаны кадры видеосъемки.

Значение осевой компоненты скорости движения пузырей рассчитывалось как $U = L/t$, где L – расстояние между лазерными ножами; t – время пролета пузыря между плоскостями лазерных ножей. Время пролета пузырей рассчитывалось как $t = (N_2 - N_1)/f$, где N_1 и N_2 – номера кадров, на которых зарегистрировано лазерное излучение, отраженное от передней поверхности пузыря при пересечении первого и второго ножей соответственно; f – частота кадров видеокамеры. В данном эксперименте измеренное значение компоненты скорости пузыря в перпендикулярном направлении относительно лазерных ножей составило 12 м/с.

Оценка возможности применения предложенного времяпролетного метода в условиях крупномасштабного течения. Необходимыми условиями применения предложенного времяпролетного метода в условиях крупномасштабного течения в испытательном боксе являются достаточность интенсивности излучения, испускаемого оптическими метками, в данном случае мыльными пузырями, при пересечении лазерных ножей, для регистрации высокоскоростной камерой и достаточность охвата камерой всего поперечного сечения бокса.

В результате модельных экспериментов было выяснено, что интенсивность испускаемого пузырем излучения при пересечении лазерного ножа в направлении видеокамеры обусловлена в основном отражением падающего излучения от поверхности пленки пузыря. Было зафиксировано, что яркость зарегистрированного блика излучения слабо зависит от расстояния, с которого производится регистрация. Следовательно, интенсивность блика связана только с интенсивностью падающего излучения. В модельном эксперименте использовался полупроводниковый лазер мощностью 1 Вт, регистрация пузырей проводилась в области лазерного ножа, где его ширина составляла приблизительно 1 м. Таким образом, для освещения лазерным ножом плоскости размером 12...15 м (размер поперечного сечения

испытательного бокса) необходимо увеличить интенсивность падающего излучения в 12...15 раз.

Для наблюдения плоскости сечения размером $(12...15) \times (12...15)$ м² необходимо комплектовать видеокамеру соответствующим объективом. Для решения этой задачи подходят широкоугольные объективы, например объектив NIKKOR Z с углом обзора $72...114^\circ$ или Canon RF с углом обзора $63...110^\circ$. Однако требуемые характеристики объектива будут зависеть от места расположения регистрирующей видеокамеры в испытательном боксе, т.е. от конкретной конструкции стенда.

Также, в зависимости от особенностей бокса конкретного испытательного стенда, возможно разбиение поперечного сечения бокса, например, на две или четыре части с формированием измерительных систем для каждой части. В этом случае можно использовать видеокамеры с меньшим разрешением.

Заключение

Выполнен анализ возможности применения оптических методов для измерения скорости в боксе стенда, предназначенного для испытаний авиационных двигателей большой размерности, и на входе во входное устройство.

Для измерения скорости на входе во входное устройство рекомендован метод PIV с измерением скоростей в двух продольных взаимно перпендикулярных диаметральных плоскостях с подачей оптических маркеров в этих плоскостях без засеивания всего потока воздуха, идущего через двигатель. Представлены оценки характеристик лазера и видеокамер, необходимых для аппаратного обеспечения указанных измерений.

Для измерения скорости в боксе испытательного стенда рекомендован времяпролетный метод, основанный на измерении времени пролета мыльных пузырей между двумя лазерными ножами, сформированными в двух поперечных сечениях бокса на известном расстоянии друг от друга. Разработан генератор одиночных мыльных пузырей, выдуваемых в воздушный поток с регулируемой частотой. Проверка предложенного времяпролетного метода измерения скорости на модельной установке подтвердила работоспособность макета измерительной системы.

Литература / Reference

1. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle imaging velocimetry: a practical guide. Berlin: Springer, 1998. 253 p.
2. DaVis flowmaster software. Manual for DaVis 7.1 / LaVision. Germany, 2005.
3. Large scale particle image velocimetry of natural and mixed convection / J. Bosbach, M. Kühn, C. Wagner et al. 2006. 12 p. (13th Intern. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 26–29 June, 2006).
4. On the use of helium-filled soap bubbles for large-scale tomographic PIV in wind tunnel experiments / F. Scarano, S. Ghaemi, G.C.A. Caridi et al. // Experiments in Fluids. 2015. Vol. 56, iss. 2. Art. 42. 12 p.

-
5. Caridi G.C.A., Sciacchitano A., Scarano F. Helium-filled soap bubbles for vortex core velocimetry // Experiments in Fluids. 2017. Vol. 58, iss. 9. Art. 130. 12 p.
 6. Development of three-dimensional air flow measuring method using soap bubbles / Y. Okuno, T. Fukuda, Y. Miwate, T. Kobayashi // JSAE Review. 1993. Vol. 14, iss. 4. P. 50–55.
 7. Helium-filled soap bubbles tracing fidelity in wall-bounded turbulence / D.E. Faleiros, M. Tuinstra, A. Sciacchitano, F. Scarano // Experiments in Fluids. 2018. Vol. 59, iss. 3. Art. 56. 13 p.
 8. Large-scale tomographic particle image velocimetry using helium-filled soap bubbles / M. Kühn, K. Ehrenfried, J. Bosbach, C. Wagner // Experiments in Fluids. 2011. Vol. 50, iss. 4: Special issue: Eighth International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV'09). P. 929–948.
 9. Tuinstra M., Sciacchitano A., Scarano F. Generation and control of helium-filled soap bubbles for PIV // Experiments in Fluids. 2019. Vol. 60, iss. 3. Art. 40. 17 p.
 10. Volumetric three-component velocimetry measurements of turbulent flow under breaking waves / F. Ting, J. Reimnitz, M. Auch, W. Lai. 2013. 12 p. (10th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV13, Delft, The Netherlands, July 1–3, 2013).

Материалы получены редакцией 23.07.2020