

ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧЕЧНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА В КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМАХ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ

С. И. Герасимов^{1,2,3}, В. И. Ерофеев⁴, А. В. Сперанский^{1,2}, К. И. Тотышев¹

¹Саровский физико-технический институт - филиал НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

²ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

³Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

⁴Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород

Описаны схемы теневого фотографирования, разработанные для регистрации в аэробаллистических экспериментах. Приводится алгоритм определения параметров таких схем, имеющий в итоге требования к характеристикам источника света (длительность, яркостная температура). Описан газоразрядный излучатель с характеристиками, удовлетворяющими для использования в перечисленных схемах. Приведены результаты использования схем в практике аэробаллистических испытаний.

Ключевые слова: теневое фотографирование, импульсный источник света, аэробаллистический эксперимент.

На всех этапах проектирования, конструирования и производства новых и перспективных летательных аппаратов требуется знание аэродинамических характеристик исследуемых моделей. Из-за ограничения возможности проведения летных испытаний важная роль в аэродинамической отработке летательных аппаратов принадлежит наземному аэробаллистическому эксперименту. Для определения экспериментальных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов применяются баллистические трассы и аэродинамические трубы, которые, в свою очередь, оснащаются регистрирующей оптико-физической аппаратурой для изучения быстропротекающих процессов. Большинство баллистических трасс, предназначенных для изучения сверхзвуковых (гиперзвуковых) летательных аппаратов, работают с использованием теневого метода оптической регистрации положений летательных аппаратов на измеряемом участке траектории движения. Это обусловлено тем, что информация, полученная теневым способом, позволяет максимально качественно визуализировать газодинамические течения, сопровождающие движение летательных аппаратов.

Классическая схема построения теневого изображения представляет собой схему, где точечный

источник излучения (тело свечения много меньше расстояния до экрана) строит расходящимися лучами теневую картину от летательных аппаратов на фоточувствительном материале (фотопленка, рентгенопленка, фотобумага, фотопластинка или ПЗС-матрица) [1].

Точечный источник света. Эффективный радиус излучателя

Новейшие оптические регистраторы не способны обеспечить качественную фиксацию объекта испытания при высокоскоростном метании без применения фоновой подсветки. Качество фотографических изображений определяет точность и эффективность обработки снимков и, в конечном итоге, достоверность определения аэродинамических характеристик. Решающую роль в этом вопросе играют геометрические и технические параметры источника света.

Источник считается точечным, если его угловой диаметр не превышает одной минуты. Принято считать, что расстояние от излучателя до облучаемой поверхности должно быть не менее десяти габаритных размеров самого излучателя. Для тел сложной формы вводят понятие эффективного ра-

диуса [1], являющейся функцией времени, определяемого площадью диска, эквивалентного мгновенному значению проекции площади боковой поверхности излучателя в направлении приемника. δ – значение апертурных потерь, равное квадрату синуса угла, под которым в данный момент виден диск излучателя с радиусом r_3 , т. е.

$$\delta(t) = r_3^2 / (r_3^2 + L^2), \quad (1)$$

где L – расстояние от центра диска до приемника.

Анализируя соотношения для точных выражений облученностей, создаваемых излучателями различной формы [1], определяем, что ошибка, вносимая при описании ламбертова излучателя через r_3 , отсутствует полностью в случае диска-излучателя и расширяющейся излучающей сферы, а для равнояркого цилиндра и прямоугольника ее можно определить из следующих формул:

$$f_1(h, r, L) = \left(\frac{hr}{hr + \pi L^2} \right) \times \frac{\pi}{r \left[\frac{h}{L^2 + 0,25h^2} + \frac{2 \arctg(0,5hL^{-1})}{L} \right]}, \quad (2)$$

где h – высота цилиндра, r – его радиус.

$$f_2(a, b, L) = \left(\frac{ab}{ab + \pi L^2} \right) 2\pi \times \left[\frac{a \arctg \left[b(L^2 + a^2)^{-0,5} \right]}{(L^2 + a^2)^{0,5}} + \frac{b \arctg \left[a(L^2 + b^2)^{-0,5} \right]}{(L^2 + b^2)^{0,5}} \right]^{-1} \quad (3)$$

где a, b – стороны прямоугольника; f_1 отличается от единицы менее чем на 1%, на расстояниях $L \geq 7r$ (при $h = r$), $L \geq 10r$ (при $h = 5r$), $L \geq 33r$ (при $h = 10r$); а f_2 – на расстояниях $8a$ (при $b = 0,5a$), $10a$ (при $b = a$), $16a$ (при $b = 2a$), $40a$ (при $b = 5a$).

Используя фотодиодный пирометрический метод [1], при котором с постоянной времени не большей, чем 70 нс одновременно регистрируются амплитуды светового импульса в разных спектральных диапазонах. По отношению сигналов за светофильтрами определяется $T_{рад}$, имеющая смысл цветовой температуры в области чувствительности пленки. По амплитуде сигнала $U(t)$, $T_{рад}(t)$ и известному расстоянию L определяется $r_3(t)$ и рассчитывается $\delta(t)$. $T_{рад}$ и δ измеряются для фонового сигнала и источника света.

Прямотеневое фотографирование

Требования к качеству получаемого фотоизображения определяются совместным учетом особенностей конкретной схемы регистрации. Важным фактором, влияющим на качество изображения, является его смаз (сдвиг), вызванный смещением объекта во время его экспонирования на пленку. В данной схеме величина допустимого смаза не должна превышать размеры изображаемого объекта, определяемые линейным пределом разрешения с учетом увеличения размера изображения на пленке по сравнению с истинным. Поскольку различные элементы регистрируемого процесса имеют различные размеры и скорости, например, головная ударная волна перед телом и турбулентные течения в следе, требования к скорости фотографирования (длительности экспозиции) могут быть разными. Для большей части волнового портрета, характеризующегося звуковой скоростью, примерные времена экспозиции t должны составлять $t \approx Ac^{-1}L^{-1}(L-l)$, где L – расстояние от источника до объекта регистрации, l – расстояние от объекта регистрации до пленки, что дает $t \approx 0,5-0,6$ мкс. Для зон в окрестности границы летящего тела и его носовой части требования жестче и для скорости ($M = 3$) длительность экспозиции должна быть примерно 0,2 мкс. С ростом коэффициента увеличения $L(L-l)^{-1}$ при той же точности источника и его длительности нерезкость изображения возрастает. В [1] проанализированы условия, связанные с помехами, вносимыми дифракцией для различных сочетаний геометрии схемы $(L, l, r_{ист})$. На практике минимальное расстояние от пленки, на котором может располагаться объект регистрации, зависит от условий эксперимента. Для реальных аэродинамических опытов, в которых помимо получения спектров обтекания модели требуется осуществить фотографметрические исследования с применением десятков дополнительных подсветок, и в которых задействуются баллистические установки различного калибра, с различными методиками отделения поддона, многоцветный теневой стенд обязан иметь широкие входные и выходные окна для пролета моделей и сопутствующих элементов удерживания моделей в стволе при выстреливании для исключения механического повреждения пленки или нарушения светозащиты. При этом для существующих стендов $L(L-l)^{-1}$ достигает 1,4 и с ростом скорости модели необходимо (для полу-

чения качественного изображения) увеличивать яркость (температуру) источника, чтобы варьировать размером тела излучения (точечностью) и/или длительностью. Соответствующие зависимости входят в систему уравнений, определяющих дополнительные требования к расчету конкретной схемы регистрации.

Получение теневых изображений в проходящем свете с помощью камеры с электронно-оптическим преобразователем

Использование электронно-оптического преобразователя для фоторегистрации прежде всего исключает фактор влияния естественной радиации, что позволяет широко использовать данные системы в практике опытов на измерительных комплексах (рис. 1). Функциональная работа электронно-оптического преобразователя описана в работе [1].

Параметры, характеризующие электронно-оптические системы, включают: размер рабочего кадра, пространственное статическое и динамическое разрешение, временное разрешение, коэффициент усиления, спектральный диапазон. Минимальный разрешаемый размер A_{\min} в данной схеме равен:

$$A_{\min} = ld / ((L-l) f R_{\text{дин}}), \quad (4)$$

где d – расстояние от камеры до рассеивающего экрана, f – фокусное расстояние объектива, L, l – расстояние от источника и от объекта регистрации до экрана соответственно, $R_{\text{дин}}$ – динамическая разрешающая способность оптико-электронной системы.

К достоинствам схемы следует отнести относительно большую зону регистрации 0,8–1,5 м (в зависимости от f и d), превышающую размер кассеты при рентгенографировании. Поэтому схема оптимальна при изучении взрывных явлений в

ближней зоне взрыва (до $100 R_0$) для определения конфигурации течения первичных и вторичных ударных волн, зоны отрыва головной ударной волны, зон кумуляции при столкновении потоков, течений при срабатывании капсулей и т. п. Использование схемы целесообразно в условиях аэробаллистического тира для получения теневых картин внутри аэробаллистических трасс при максимальных режимах испытаний, когда регистрация на открытую пленку невозможна, и вне измерительного участка трасс (в любое время суток) для осуществления регистрации на участке от среза ствола до отсекавателя поддонов.

В случае визуализации малых высокоскоростных осколков существенным становится длительность экспонирования фотослоя. Задачи, связанные с осколочной тематикой, требуют регистрировать объекты размером до 4–8 мм на скоростных режимах до $10\text{--}15 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. Допустимый сдвиг изображения при скорости осколка порядка $10 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ требует уменьшения времени экспонирования, что может быть достигнуто за счет уменьшения длительности источника света. Экспонирование пленки осуществляется точечным источником света с длительностью импульса в несколько раз меньшим времени работы затвора электронно-оптического преобразователя. Инерционность работы источника света и оптико-электронной системы учитываются задаваемой блоком задержки установкой при одновременном запуске подрывной установки и пульта управления камерой, так что время работы источника приходится на среднюю фазу работы затвора. Чтобы сдвиг изображения не влиял на качество снимка, он не должен превышать величины:

$$\Delta \leq 1,2 \cdot 1(L/(L-l))m^{-1}vt, \quad (5)$$

в то время как для систем электронного преобразования оптического сигнала с выдержкой $t = 1,5 \text{ мкс}$ на режимах испытаний $v = 10 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$

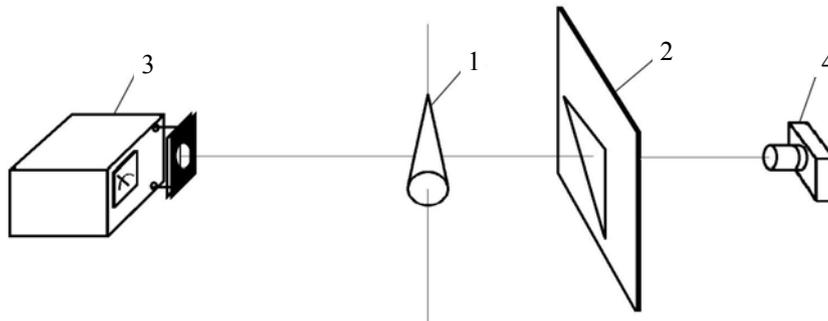


Рис. 1. Теневая схема фотографирования с камерой с электронно-оптическим преобразователем: 1 – объект испытаний (ОИ); 2 – полупрозрачный экран для построения теневых изображений ОИ; 3 – точечный источник света; 4 – цифровая камера

величина смаза может достигать 0,15 мм ($m = 100$) при размере самого изображения 0,08 мм, что недопустимо. Динамическая разрешающая способность системы должна обеспечивать на пленке кружок нерезкости в два раза меньший, чем сдвиг изображения, т. е. 0,05 мм, так как расстояние между двумя контрастными линиями в изображении объекта должно быть различимо глазом. То есть динамическое разрешение для задач осколочной тематики должно составлять не менее 20 мм^{-1} .

Комбинированная схема фоторегистрации

Для решения задачи одновременной регистрации летательных аппаратов в отраженном и проходящем свете была создана схема регистрации на базе электронно-оптического комплекса для скоростной регистрации серии изображений быстропротекающего процесса «NANOGATE - Frame 4» (рис. 2). Комбинированный фотопост включает точечный излучатель 1 с импульсным источником света 2, связанным с системой синхронизации момента его запуска с моментом появления летательного аппарата в зоне регистрации, диффузионно-рассеивающий полупрозрачный экран 4, камеру 3 с электронно-оптическим преобразователем, расположенную от источника за экраном, и

дополнительную камеру 3* с электронно-оптическим преобразователем перед экраном со стороны импульсного источника света. Одна из камер комбинированного фотопоста вела съемку в отраженном свете, что одновременно обеспечивало получение изображения объекта и теневого спектра его обтекания на экране, а вторая – через полупрозрачный экран в теновом режиме (получение теневого спектра обтекания летательного аппарата). Были подобраны оптимальные параметры излучателя источника света, причем светотехнические параметры удовлетворяют условиям обеспечения регистрации в проходящем и отраженном свете при данном типе экрана, расстояния до элементов схемы и режимы работы камер [2].

Разработанный газоразрядный излучатель (рис. 3) сконструирован таким образом, что, с одной стороны, он обладает необходимыми светотехническими параметрами, достаточными для построения изображения модели в отраженном свете (яркость $\approx 6,2 \text{ Мсб}$, тело свечения $0,785 \text{ см}^2$, светочувствительность фотопленки $S_{0,8} \approx 1000 \text{ ед. ГОСТ}$), а с другой – имеет достаточно малое тело свечения ($\varnothing 10 \text{ мм}$) для того, чтобы являться точечным источником света теневой схемы и строить на диффузионном экране теневые спектры.

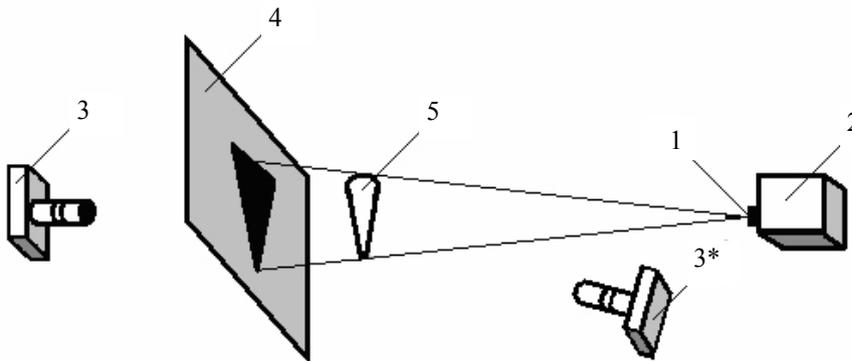


Рис. 2. Схема комбинированного фотопоста



Рис. 3. Вид газоразрядного излучателя

Реализованная схема комбинированного фотопоста на базе цифровых фотокамер с длительностью затворного импульса до 20 нс, что позволило регистрировать без видимого смаза (1 мм) модели, движущиеся со скоростью до $50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ [3].

Комбинированный фотопост применялся более чем в 500 аэродинамических опытах (рис. 4). Была проведена серия опытов по:

– исследованию стойкости тугоплавких материалов к аэротермомеханическому разрушению

при полете с гиперзвуковыми скоростями (рис. 5);

– определению аэродинамических характеристик стальной цельнометаллической модели, летящей с скоростями $V = 2,1\text{--}3,2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 6).

Составные элементы комбинированного фотопоста мобильные и могут оснащаться дополнительными источниками света, что позволяет развертывать пост регистрации на любой точке траектории движения модели, тем самым становится возможным проводить регистрацию, в том числе

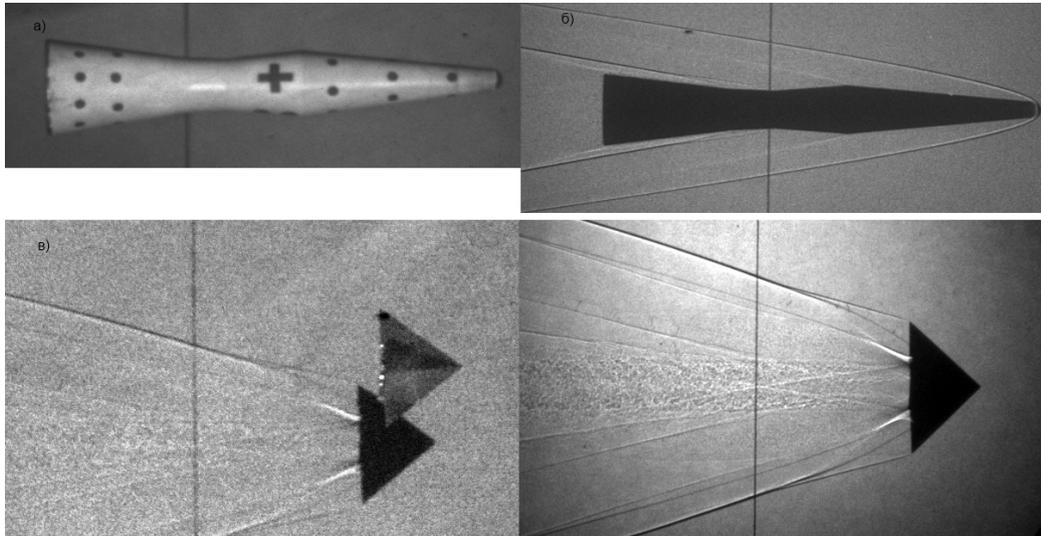


Рис. 4. Пример регистрации комбинированного фотопоста:
 а – модель в отраженном свете $V = 1,95 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$; б – модель в теневом режиме;
 в – модель с «оптимальными» аэродинамическими обводами $V = 1,53 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

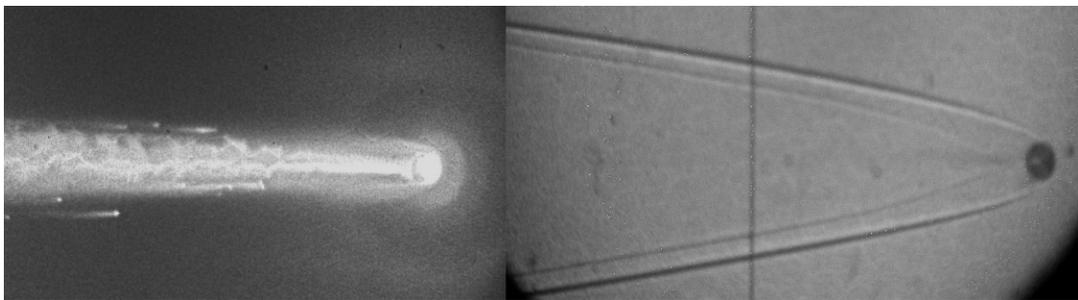


Рис. 5. Регистрация модели, летящей со скоростью $V = 5,27 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

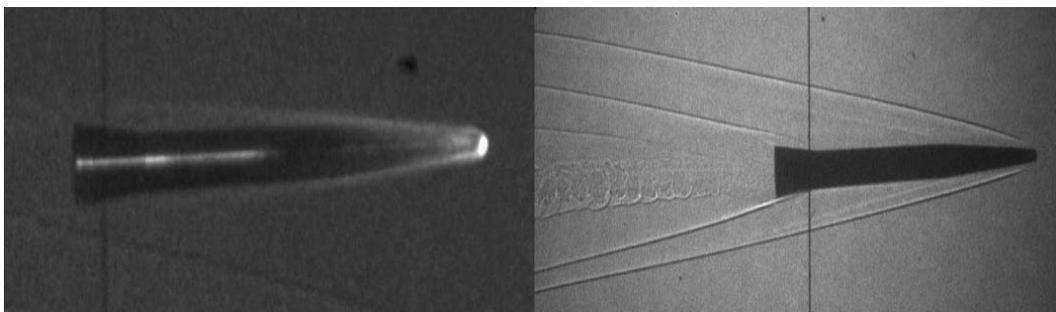


Рис. 6. Регистрация модели, летящей со скоростью $V = 2,8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$

и на участке промежуточной баллистики, где требуется, например, одновременно с информацией о расхождении в процессе движения крупногабаритных элементов объекта испытаний: модели, поддона с обкладками или только модели и обкладок для бесподдонной схемы метания (эта часть задачи решается теневым методом), получить информацию о состоянии поверхности этой модели, а также после дешифрования полученных фотографий (рис. 5) определить динамические характеристики летательного аппарата [4].

Варьирование параметров элементов теневой схемы позволяет наиболее полно адаптировать условия оптической диагностики к целям и задачам программы испытания. Разработана и реализована схема комбинированного фотопоста с использованием в качестве точечного источника света газоразрядного излучателя, позволяющая проводить фоторегистрацию как в отраженном так и проходящем свете в диапазоне скоростей до $5 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$.

Список литературы

1. Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
2. Тотышев К. В. Фоторегистрация быстропротекающего процесса при сильных фоновых подсветках // Атом, 2009, № 44.
3. Герасимов С. И., Менде Н. П., Тотышев К. В. Система теневого фотографирования быстропротекающего процесса // Бюллетень № 25 от 10.09.08. Патент 76166 Российская Федерация.
4. Герасимов С. И., Тотышев К. В., Лысенков В. Е., Позлевич В. П. Система для определения околоскоростной скорости объекта испытаний при его высокоскоростном метании (варианты) // Бюллетень № 23 от 20.08.11. Патент 107592 Российская Федерация.

Статья поступила в редакцию 12.11.2013