САРОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЯУ МИФИ

Алгоритмы определения параметров схем теневого фотографирования

С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, А.В. Сперанский, К.В. Тотышев

УДК 528.7, 533.6

Алгоритмы определения параметров схем теневого фотографирования: пособие для студентов вузов С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, А.В. Сперанский, К.В. Тотышев

Для студентов и аспирантов физических специальностей вузов и технических университетов. Может быть полезна инженерам и научным работникам, специализирующимся в области проектирования летательных аппаратов, измерений в аэробаллистическом эксперименте, специальном приборостроении. Материалы пособия входят в курс лекций, читаемых в СарФТИ НИЯУ МИФИ, кафедра «Специальное приборостроение».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1. Основы метода светящейся точки	4
1.1. Формула Лорентца-Лоренца	4
1.2. Отклонение света при его прохождении через	
неоднородности плотности прозрачной среды	7
1.3. Параметры схемы в методе светящейся точки	9
1.4. Искажения силуэта в методе светящейся точки	11
1.5. Измерения по теневым изображениям	13
2. Схемы теневого и силуэтного фотографирования,	
используемые на многоцелевом испытательном	
комплексе	20
3. Алгоритм опредеделения параметров схем п.2	50
3.1. Энергетическое представление фотометрических	
величин	50
3.2. Эффективный радиус излучателя. Точечность	51
3.3. Алгоритм вычисления плотности поглошенных	
квантов по паспортным значениям фотоматериала	
вед. ГОСТ	.54
34 Формулы расчета схем теневого и силуэтного	
homosnahunoeauug	57
фотосрифированая	
Список литературы.	92

ВВЕДЕНИЕ

При отработке и проектировании образцов вооружения и военной техники различных видов одним из важнейших элементов является экспериментальная отработка комплексов и систем, в ходе которой разработчик получает реальную и достоверную информацию, позволяющую оценить их боевые, технические и эксплутационные характеристики, а также проверить их соответствие требованиям тактико-технических заданий. Входящие в состав развитой и дееспособной экспериментальной базы, средства оптико-физических измерений призваны помогать решать многочисленные задачи, в числе которых важнейшими являются следующие:

- разработка новых образцов ракетной техники, включая получение внешнетраекторных измерений и детальной информации о структуре потоков около летательных аппаратов;

- прогнозирование влияния продуктов детонации на конструкции, обеспечивающие хранения и транспортировку спецматериалов и грузов, последствий ударного воздействия на содержащие ВВ системы;

- изучение ударного взаимодействия твердых тел, процессов фрагментации оболочек продуктами детонации, развития гидродинамических неустойчивостей, пыления, отколов.

Приводятся модель выбора И расчета схем теневого фотографирования быстропротекающих процессов, в том числе, сопровождающихся самосвечением, включающая себя в пирометрические измерения и формулировку требований к параметрам источника света для данного конкретного опыта.

Новое направление в методах теневого и силуэтного фотографирования связано с применением кумулятивных источников света, что позволяет применять эти методы в качестве оптической условиях современных испытаний новой техники и диагностики в проведения исследований прикладного и фундаментального характера. Описывается модель выбора и расчета схем теневого и силуэтного фотографирования быстропротекающих процессов, в том числе, сопровождающихся самосвечением. Применяется закон 0 фотохимическом эквиваленте: вводятся понятия функции актиничности через плотность поглощенных квантов и приводится алгоритм расчета этой функции для данного фотоматериала с учетом его спектральной и интегральной чувствительностей. С помошью фотодиодного пирометрического метода измерений, определяются: изменение во времени яркостной температуры регистрируемого процесса, эффективный радиус фонового излучателя и коэффициент точечности.

2

По этим параметрам определяются схемы регистрации, при которых плотность почернения от фонового излучения лежит в рабочем интервале. Для выбранной схемы определяется комбинация параметров источника света, при которых достигается требуемое фотографическое качество для данного регистрируемого процесса

Приводятся расчетные формулы и даются графики сочетания параметров источника света (длительность, точечность, яркостная температура) для ряда схем, включая:

- прямотеневое фотографирование на высоко(низко)чувствительную пленку без/с защитным светофильтром;

- то же с получением изображений во взаимно перпендикулярных плоскостях;

- комбинированная схема для получения прямого и теневого изображений с помощью камеры с открытым затвором; то же с заданной выдержкой;

- высокочастотная силуэтная киносъемка;

- регистрация в проходящем свете с построением изображения на вспомогательном экране с выдержкой:

а) задаваемой камерой с ЭОП,

б) задаваемой источником света.

1. Основы метода светящейся точки

1.1. Формула Лорентца-Лоренца

В основе теневых методов регистрации оптических неоднородностей лежит закон Лорентца-Лоренца, качественный вывод которого следует из классических основ молекулярной физики /1/.

Рассмотрим поведение среды в электромагнитном поле световой волны. Из электромагнитной теории света следует соотношение:

$$\varepsilon = n^2 = \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}\right)^2 = \left(\frac{c}{c'}\right)^2,\tag{1.1}$$

где n — показатель преломления изотропной среды, представляющий собой отношение скорости света в вакууме c к скорости света в среде c' (отношение синуса угла падения к синусу угла преломления).

В сильно разреженном газе - таком, что влиянием соседних молекул на рассматриваемую молекулу можно пренебречь, эффективное поле, действующее на нее, равно внешнему полю \vec{E} .

В этом случае:

$$\varepsilon \vec{E} = n^2 \vec{E} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}, \qquad (1.2)$$

а поскольку $\vec{P} = N_1 a \vec{E}$, то

$$n = 1 + 2\pi N_1 a . \tag{1.3}$$

Здесь N_I – число молекул в 1 см³, a – скаляр, характеризующий поляризуемость молекулы, имеющий порядок величины куба линейных размеров молекулы.

В случае плотной изотропной среды (сжатый газ, жидкость) каждая молекула находится не только под действием внешнего поля \vec{E} световой волны, но и под действием полей, создаваемых диполями, которые индуцируются в остальных молекулах среды. Необходимо определить эффективное поле. влияющее на молекулу. Соответствующий расчет был проведен Г. Лорентцом (1935). Рассматривается находящееся между обкладками вещество, конденсатора, в котором задана напряженность внешнего поля E. Вокруг рассматриваемой молекулы описывается сфера радиуса \vec{r} такого, чтобы в ней содержалось большое количество молекул (рис. 1.1).

4



Рис. 1.1 - К расчету внутреннего поля

Напряженность действующего на молекулу поля равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3, \tag{1.4}$$

где
$$F_1 -$$
 поле, создаваемое обкладками конденсатора:
 $\vec{F}_1 = \vec{E} + 4\pi \vec{P}$, (1.5)

 \vec{P} – поляризация вещества, \vec{F}_2 – поле, обусловленное поляризацией вещества внутри конденсатора, за вычетом вещества, находящегося внутри сферы. Поляризация последнего создает поле \vec{F}_3 . Проведенная сфера не пересекает ни одной молекулы: каждая молекула, как целое, участвует в создании либо поля \vec{F}_2 , либо \vec{F}_3 . Поле \vec{F}_2 состоит из двух частей: из напряженности, создаваемой слоем зарядов, индуцированных в диэлектрике у обкладок конденсатора,

$$\vec{F}_2 = -4\pi \vec{P}, \qquad (1.6)$$

и напряженности поля \vec{F}_2'' , создаваемого зарядами, индуцированными на поверхности сферы,

$$\vec{F}_2 = -4\pi \vec{P} + \vec{F}_2'' \,. \tag{1.7}$$

Вычислим F_2 . Плотность зарядов на поверхности сферы равна $P\cos \vartheta$, где ϑ – угол между положительным направлением поля и нормалью в данной точке сферы. Каждый элемент поверхности сферы $d\Omega$ создает в направлении поля напряженность, равную в центре сферы радиуса r:

$$\frac{P_n \cos \vartheta}{r^2} d\Omega = \frac{P \cos^2 \vartheta}{r^2} d\Omega.$$
(1.8)

Интегрируя по поверхности всей сферы, имеем:

$$F_2'' = \int \frac{P_n \cos \vartheta}{r^2} d\Omega = \int_0^\Omega \frac{P \cos^2 \vartheta}{r^2} 2\rho r^2 \sin \vartheta d\vartheta = \frac{4\pi}{3} P \quad (1.9)$$

и, следовательно,

$$\vec{F}_2 = -4\pi \vec{P} + \frac{4\pi}{3} \vec{P} \,. \tag{1.10}$$

Вычисляем поле \vec{F}_3 , создаваемое молекулами, находящимися внутри сферы. Считаем, что поле каждой молекулы есть поле диполя. Потенциал в точке (x_{0,y_0,z_0}), создаваемый диполем, находящимся в точке ($x_{y,z}$), отстоящей от (x_{0,y_0,z_0}) на r', равен:

$$\varphi(x_0, y_0, z_0) = \frac{\vec{P}\vec{r}}{{r'}^3} = \frac{P_x(x_0 - x) + P_y(y_0 - y) + P_z(z_0 - z)}{{r'}^3}$$
(1.11)

В начале координат, в точке $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ поле имеет x-ую составляющую, равную

$$-\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_0}\right)_{x_0,y_0,z_0} = -\frac{P_x}{r'^3} + \frac{3}{r'^5} \left(P_x x^2 + P_y x_y + P_z x_z\right).$$
(1.12)

Считая, что диполи во всех молекулах одинаковы, имеем:

$$(F_3)_x = P_x \left\{ -\sum_k \left\{ \frac{1}{r_k'^3} + \sum_k \left\{ \frac{3x_k^2}{r_k'^5} \right\} + 3P_y \sum_k \left\{ \frac{x_k y_k}{r_k'^5} + 3P_z \sum_k \left\{ \frac{x_k z_k}{r_k'^5} \right\} \right\} \right\}$$
(1.13)

Суммирование распределяется на все молекулы, находящиеся внутри сферы, за исключением находящейся в ее центре. При хаотическом расположении диполей имеем уравнение:

$$(F_3)_x = (N-1) \left[P_x \left\{ -\left(\frac{1}{r'^2}\right) + \left(\frac{3x^2}{r'^5}\right) \right\} + P_y \left(\frac{3xy}{r'^5}\right) + P_z \left(\frac{3xz}{r'^5}\right) \right] (1.14)$$

Здесь *N* – число молекул внутри сферы. Так как в изотропном теле:

$$\bar{x}^2 = \bar{y}^2 = \bar{z}^2 = \frac{1}{3}\bar{r'}^2; \ x\bar{y} = x\bar{z} = y\bar{z} = 0,$$
 (1.15)

получаем $F_3 = 0$. Итого:

$$\vec{F} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} - 4\pi\vec{P} + \frac{4\pi}{3}\vec{P} = \vec{E} + \frac{4\pi}{3}\vec{P}.$$
 (1.16)

Сопоставив это выражение с

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}, \qquad (1.17)$$

находим

$$\vec{F} = \vec{E} + \frac{4\pi}{3} \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \vec{E} = \frac{\varepsilon + 2}{3} \vec{E} = \frac{n^2 + 2}{3} \vec{E} .$$
(1.18)

Это – выражение лорентцова внутреннего поля. Так как

$$\vec{P} = N_1 a \vec{F} , \qquad (1.19)$$

находим

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} N_1 a \tag{1.20}$$

ИЛИ

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} N_1 a \,. \tag{1.21}$$

Последнее соотношение называется формулой Лорентца-Лоренца. Для газов эта формула может быть записана в виде:

$$\frac{n-1}{\rho} = const , \qquad (1.22)$$

где для воздуха постоянная в (1.22) равна 0,22635 см³/г.

1.2. Отклонение света при его прохождении через неоднородности плотности прозрачной среды

Формула Лорентца-Лоренца математически выражает возможность исследования распределения плотности в потоке, учитывая отклонение света из-за изменения коэффициента преломления. На эту возможность впервые указал Э. Мах (1893) /2,3/. преломления в двух областях течения Если коэффициенты соответственно равны n_1 и n_2 и ϕ – угол, образуемый лучом с η к границе раздела между двумя областями, нормалью различающимися по плотности, то изменение направления луча (преломление на угол ψ) при прохождении границы раздела (рис. 1.2):



Рис. 1.2– Изменение направления луча. Изменение *n* можно записать как:

$$n_1 = n_2 - \left(\frac{\partial n}{\partial l}\right)_2 dl , \qquad (1.23)$$

где dl – элемент траектории луча. Если τ (рис. 1) - малая разница между углами φ и ψ :

$$\sin \psi = \sin \varphi - \tau \cos \varphi$$

$$\tau \cos \varphi = \sin \varphi \frac{\partial n}{\partial l} \frac{dl}{n} \qquad (1.24)$$

Если G - градиент коэффициента преломления вдоль нормали

 η :

$$G = \frac{\partial n}{\partial \eta} = \frac{\partial n}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial \eta} = \frac{\partial n}{\partial l} \frac{1}{\cos \varphi}$$
(1.25)

$$H r = -\frac{G}{n}\sin\varphi dl, \qquad (1.26)$$

то есть угол поворота луча пропорционален длине элемента траектории и градиенту коэффициента преломления.

Кривизна луча в каждой точке траектории:

$$\frac{1}{r} = \frac{\tau}{dl} = \frac{G\sin\varphi}{n}.$$
(1.27)

Поскольку

$$\frac{\partial \rho}{\partial n} = \frac{\rho_0}{n_0 - 1} \frac{\partial n}{\partial \eta} = \frac{\rho_0}{n_0 - 1} G , \qquad (1.28)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \frac{\sin \varphi}{n} \frac{n_0 - 1}{\rho_0} = \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \frac{\sin \varphi(n_0 - 1)}{\rho_0 + \rho(n_0 - 1)}, \qquad (1.29)$$

то есть угол поворота пропорционален градиенту плотности и элементу длины траектории.

Указанное обстоятельство позволяет относительно просто визуализировать слабые оптические (прозрачные) неоднородности, которые при «обычном» фотографировании в отраженном свете не видны.

1.3. Параметры схемы в методе светящейся точки

Оценку параметров этой простейшей схемы, не требующей дополнительного оптического оборудования, сделал Г.Д. Саламандра /4/. Он же назвал эту простейшую прямотеневую схему визуализации схемой Дворжака, указав 1880 год. Поскольку конкретной ссылки это утверждение не содержит, далее эта схема традиционно именуется методом светящейся точки.

Из вышеизложенного (р.1.2) следует принципиальная схема регистрации оптической неоднородности. Свет от точечного источника (излучателя) проходит через исследуемую область, и при наличии в ней оптической неоднородности отклоняется от первоначального направления, образуя на некотором экране (для наблюдения или

съемки) теневую картину. Если градиент показателя преломления $\frac{\partial n}{\partial y}$

на всем протяжении исследуемой области остается постоянным, то все лучи отклоняются на одну и ту же величину и изменения освещенности на экране не наблюдается. Если этот градиент меняется, т.е. вторая

производная $\frac{\partial^2 n}{\partial^2 y}$ не равна нулю, то отклонение лучей будет различным

и соответственно произойдет перераспределение освещенности на экране. Если градиент показателя преломления на всем протяжении неоднородности остается постоянным, то освещенность экрана изменяется только на границах изображения неоднородности. Одной из базовых характеристик качества изображения является его контраст, что требует обеспечения максимального относительного изменения экрана. освещенности Считая, что оптическая неоднородность отклоняет проходящие через нее лучи на малый угол θ , $\delta\theta \rightarrow 0$, выразим относительное изменение освещенности экрана, пропорциональное отношению смещения луча бу к размеру теневого изображения r* (рис.1.3):



Рис. 1.3.- Схема метода светящейся точки

Поскольку $f + \ell = \text{const}$, из уравнения (1.30) следует, что максимальное относительное изменение освещенности экрана в данной схеме достигается, когда объект располагается посередине между источником и экраном ($\ell = f$). Контрастность изображения улучшается с увеличением расстояния от источника до экрана ($\ell + f$).

Конечные размеры источника света также влияют на контрастность изображения. Авторами введен параметр точечности для теневых схем /5/, математически выражаемый как квадрат синуса половины угла, под которым виден излучатель (плоский диск или сфера). Этот параметр чрезвычайно удобен в расчете схем (см. Гл.3), поскольку он зависит от радиуса излучателя и расстояния до экрана (т.е. параметров схемы), а также определяет изменение равновесного потока излучения на оси в центре освещаемого экрана параллельного излучателю.

10

Тогда уменьшение контрастности изображения – отношение «размытого» изображения источника к размеру теневого изображения неоднородности г (рис.1.3):

$$\frac{d_{\mathfrak{s}}}{r^*} = \frac{f}{l+f} \cdot \frac{d_0}{r} \tag{1.31}$$

Это соотношение минимально при d_0 , $f \rightarrow 0$, т.е. теневая картина контрастней при уменьшении размеров источника (точечности), и (либо) расстояния от регистрируемой неоднородности до экрана (при заданной точечности схемы).

1.4. Искажения силуэта в методе светящейся точки

Помимо оптических неоднородностей теневой метод визуализирует силуэт (контур) непрозрачных тел (объектов), проекции которых в момент работы точечного источника попадают в зону экрана. На экране (фотопленке) фиксируется косоугольная (центральная) проекция объекта, контур которого несколько размыт из-за дифракции света на краю объекта. Расстояние между геометрической тенью изображения и первым дифракционным минимумом $\Delta = (\lambda \cdot f \cdot l/(f + l))^{0.5}$ задает нерезкость изображения. Поскольку отношение между расстоянием от геометрической тени до первого дифракционного минимума и смещением изображения на экране $\frac{\Delta}{r}$ (рис.1.3) пропорционально $(f \ell^3)^{\frac{1}{2}}$, то помехи, вносимые дифракцией с учетом

уменьшения контрастности за счет конечных размеров источника, являются наибольшими в том случае, когда расстояние между объектом и экраном составляет три четверти расстояния между источником и экраном.

Это размытие является равномерным по всему контуру, так что при корректном проведении измерений (справа и слева, сверху и снизу) оно сказывается только на точности позиционирования визира измерительного прибора. Более значимые искажения контура объекта вызваны косоугольной проекцией и рефракцией света в областях сильных градиентов плотности газа около объекта. Если первые поддаются учету, то вторые оказываются неустранимыми. Как показал опыт специалистов ФТИ им. А. Ф. Иоффе, при скоростях, соответствующих числу Маха около 5, даже на проекции параллельным пучком трудно идентифицировать контур модели аппарата «Союз», особенно если она движется под углом атаки, несмотря на то, что

расстояние между моделью и фотопленкой составляло около 250 мм /7/. Точность определения углового положения объекта такого малого удлинения оказывается неудовлетворительной. Удлиненные модели, вопервых, не вызывают таких сильных градиентов плотности газа, и, вовторых, предоставляют более широкий выбор точек отсчета вдоль своего контура, поэтому они могут успешно исследоваться с использованием прямотеневой схемы регистрации. Тем не менее, даже в случае идеального точечного источника и идеальной геометрии статического объекта следует учитывать особенности схемы и возможные искажения при проведении измерений. Например, то, что проекция шара будет представлять собой эллипс, а проекция основания прямого круглого конуса будет выглядеть дугой (рис.1.4, 1.5). В эксперименте, где взаимное расположение точечного источника и летящей модели может быть произвольным друг относительно друга в момент съемки (как расстояние и положение модели относительно плоскости экрана), внешнетраекторные измерения по проекции требуют применения специальных операций.



Рис. 1.4. Теневое изображение конуса. Объект: конус с углом полураствора γ.

На проекции: $tg\gamma^* = \frac{tg\gamma}{\sqrt{1 - \left(\frac{y_0}{x_0} tg\gamma\right)^2}}$. Ось конуса параллельна экрану и

пересекает нормальный к экрану луч.



Рис. 1.5. Объект: сфера с радиусом *R*. Изображение: эллипс с полуосями

a, b:
$$a = Rk \frac{\sqrt{1 - \frac{R^2}{x_0^2} + \lg^2 \alpha}}{1 - \frac{R^2}{x_0^2}};$$
 $b = Rk \sqrt{\frac{1 + \lg^2 \alpha}{1 - \frac{R^2}{x_0^2} + \lg^2 \alpha}},$ где
 $k = \frac{x_0 + f}{x_0}$ – оптическое увеличение схемы.

1.5. Измерения по теневым изображениям

Положение летящей модели в пространстве и направление ее движения определяются в аэродинамике с помощью трех прямоугольных систем координат. стартовой (земной, геодезической),

связанной и скоростной (поточной). Две последние системы имеют начало в центре массы модели и определяют ее ориентировку в пространстве (направление осей связанной системы координат относительно стартовой системы координат через углы тангажа, рыскания и крена) и взаимное положение продольной оси модели и вектора ее воздушной скорости, направленной касательно к траектории движения ее центра массы. При этом угол рысканья у это угол между земной осью x₀ (близкой к направлению полета) и проекцией продольной (связанной) оси модели x₁ на горизонтальную плоскость. Угол тангажа v это угол между продольной осью модели x1 и горизонтальной плоскостью. (Из последнего определения следует, что при пространственном движении по двум ортогональным проекциям непосредственно измеряется только угол рысканья, действительный угол тангажа нужно определять с учетом угла рысканья, поскольку по снимку измеряется угол между проекцией оси модели на вертикальную плоскость, проходящую через земную ось x_0 , и этой осью. При решении обратной задачи динамики это обстоятельство необходимо учитывать при вычислении т.н. невязок между действительными вычисленными углами тангажа и результатами измерений видимого угла в вертикальной плоскости, то есть, необходимо «спроектировать» расчетный угол тангажа на вертикальную плоскость, содержащую земную ось x_0). Угол крена γ это угол между связанной осью y_1 (перпендикулярной оси x_1 и лежащей в плоскости симметрии модели) и вертикальной плоскостью, проходящей через продольную ось x₁. Угол скольжения β это угол между вектором скорости V и плоскостью симметрии летательного аппарата Ох₁у₁. Угол атаки α это угол между проекцией вектора скорости V на плоскость симметрии летательного аппарата Ox_1y_1 и продольной осью аппарата x_1 .

Оба последних угла вычисляются как арктангенсы отношений соответствующих проекций скорости снаряда на связанные оси в ходе решения *прямой* задачи движения при некотором приближении подлежащих определению аэродинамических коэффициентов /6/:

$$\alpha = -\operatorname{arctg} \frac{V_{y_1}}{V_{x_1}} \qquad \beta = \operatorname{arctg} \frac{V_{z_1}}{\sqrt{V_{x_1}^2 + V_{y_1}^2}} \quad (1.35)$$

Пространственное положение модели (снаряда) часто характеризуют в терминах Эйлеровых углов принятых в теории динамики твердого тела. В частности, используются :*угол нутации* – угол между осью снаряда и земной (неподвижной) осью системы координат и *угол прецессии*, выражающий положение угла нутации относительно плоскости полета.

Угол атаки на теневой картине может быть определен как угол между продольной осью «снаряда» и направлением движения (т.е. вектором скорости). На рис. 1.6 приведена схема для оценки параметров движения снаряда. Скорость снаряда по снимку можно оценить как М·х/г. Такой метод оценки допустим в том случае, если заведомо известно, что снаряд совершает плоское движение, причем плоскость колебаний параллельна плоскости изображения. В общей постановке, предполагающей асимметрию тела как по форме, так и по распределению масс (несимметричные поперечные моменты инерции) задача определения угла атаки решается через проекции вектора скорости (1.35).

Для проведения пространственных измерений необходимо иметь изображения двух проекций объекта, полученных в расходящихся (или параллельных) пучках света, центральные лучи которых ортогональны друг другу. Осуществляется пересчет измеренных косоугольных координат характерных точек объекта, видимых на двух проекциях, в декартовы координаты с использованием геометрии освещения.

Предполагается, что в кадр с изображением объекта впечатано изображение реперов (штрихов или линий), образующих систему координат кадра, привязанную к единой лабораторной системе координат, а также метки, позволяющие определить направление этих осей и масштаб снимка. Привязка по продольной оси (вдоль направления движения объекта) может быть осуществлена лишь по одному из кадров, поэтому одна из проекций (обычно на горизонтальную плоскость) может не содержать реперов для отсчета продольной координаты, а лишь изображение нити, положение и ориентация которой относительно продольной оси лабораторной системы известны.

Кроме этого перед проведением измерений необходимо выбрать характерную точку изображения. За характерную точку может быть принята любая точка на объекте или вне его, положение которой однозначно связано с объектом и может быть определено на всех проекциях.

При выборе характерной точки следует учитывать искажения контура объекта на изображении, вызванные рефракцией света в областях сильных градиентов плотности газа, обтекающего объект. Иногда удобно выбрать две (или несколько) точек на снимке и путем геометрических построений определить положение характерной точки. Так, при измерении координат центра масс летящего шара его положение вдоль направления полета определяется точкой пересечения касательной к контуру шара в задней критической точке, проведенной перпендикулярно продольной реперной оси. При этом предполагается, что изменением искажений контура шара вдоль траектории из-за падения скорости можно пренебречь. Чтобы исключить изменение этих искажений при измерении поперечных координат центра шара, разумно проводить измерение координат середины отрезков между двумя касательными к контуру изображения шара, проведенными параллельно продольной оси кадра.



Рис.1.6. К расчету параметров движения снаряда по теневой картине обтекания

При измерениях координат центра масс острого или притупленного конусов за характерную точку можно принять либо вершину конуса в первом случае, либо точку пересечения прямых, совпадающих с изображениями проекций образующих конуса - во втором. В этих случаях потребуется пересчет измеренных координат характерных точек в координаты центра масс с учетом угловой ориентации конуса на каждом кадре. Положение характерной точки относительно центра массы (ЦМ) модели должно быть известно заранее.

Ниже будет дан вывод формул для пересчета координат точки двух проекций в лабораторную систему координат. На рис. 1.7 показана схема оптической системы одного из постов регистрации теневых картин в плоскости, перпендикулярной оси баллистической трассы. Координаты точки O – точки пересечения центральных лучей двух взаимно перпендикулярных проекций – в системе отсчета, связанной баллистической трассой, считаются заданными. Для каждой проекции известны также значения H_i , b_i – расстояния от фотопленки до источника света и точки O соответственно.



Рис. 1.7. Схема оптической системы, 1-пленка, 2- источник света.

Связь между измеряемыми на центральных проекциях координатами точки А (x', y') и (x', z') и декартовыми координатами (x, y, z) дается системой уравнений:

$$\begin{cases} (y' - y) \cdot H_{z} = (b_{z} - z) \cdot y' \\ (z' - z) \cdot H_{y} = (b_{y} - z)z' \\ (x' - x) \cdot H_{z} = (b_{z} - z)x' \end{cases}$$
(1.36)

Решение этой системы имеет вид:

$$z - z' \cdot \frac{H_{y}H_{z} - b_{y}H_{z} + (H_{z} - b_{z})y'}{H_{y}H_{z} - y'z'}$$

$$y = y' \cdot \frac{H_{y}H_{z} - b_{z}H_{y} + (H_{y} - b_{y})z'}{H_{y}H_{z} - y'z'}$$

$$x = x' \left(1 - \frac{(b_{z} - z)}{H_{z}}\right)$$
(1.37)

Если измеряемая точка расположена на расстоянии L_0 от центра масс модели вдоль оси симметрии, то координаты центра масс вычисляются по формулам:

$$X_{IIM} = x + L_0 \cos \alpha \cos \beta$$

$$Y_{IIM} = y + L_0 \sin \alpha \cos \beta$$

$$Z_{IIM} = z + L_0 \cos \alpha \sin \beta$$

(1.38)

Здесь углы α и β - измеренные на проекциях углы тангажа (вертикальная проекция) и рыскания (горизонтальная проекция). С учетом данных привязки имеем координаты центра масс модели в системе отсчета, связанной с баллистической трассой.

Сканирование фотографий летящего объекта должно быть проведено с разрешением не хуже разрешающей способности применяемой оптической системы. Например, фотографии, полученные в масштабе 1:1 с использованием теневого прибора ИАБ-451, обеспечивающего пространственное разрешение 0.1 мм, необходимо сканировать с разрешением не ниже 300 dpi. К такому расчету разрешения сканирования следует относиться как к оценочному, поскольку сканер вносит определенные искажения. Для более точного определения необходимого разрешения сканирования следует предварительно провести калибровку сканера /55/.

2. Схемы теневого и силуэтного фотографирования, используемые на многоцелевом испытательном комплексе

Для осуществления регистрации в задачах п.2 разработана модель выбора и расчета схем теневого и силуэтного фотографирования быстропротекающих процессов, в том числе сопровождающихся самосвечением. Применяется закон о фотохимическом эквиваленте; вводятся понятия функции актиничности через плотность поглощенных квантов и приводится алгоритм расчета этой функции для данного фотоматериала (ПЗС-матрицы) с учетом его (ее) спектральной и чувствительностей. С помощью фотодиодного интегральной пирометрического метода измерений определяются: изменение во времени яркостной температуры регистрируемого процесса, эффективный радиус фонового излучателя и коэффициент точечности. По этим параметрам определяются схемы регистрации, при которых плотность почернения от фонового излучения лежит в рабочем интервале. Для выбранной схемы определяется комбинация параметров источника света, при которых достигается требуемое фотографическое качество для данного регистрируемого процесса. В таблице 2.1 перечислены некоторые схемы, результаты применения которых приведены в данной монографии в качестве иллюстративного материала.

Таблица	2.	1
---------	----	---

Ho-	Вил схемы	Принципиальная схема и пример ее	Особенность схемы	Лит
мер		использования		-pa
Но- <u>мер</u> 1.1	Вид схемы Прямотеневая регистрация на высокочувстви- тельную пленку с использованием взрывного источника света Взрывной источник света, использующий сжатие в условиях остроугольной геометрии с фазовым ускорением	Принципиальная схема и пример ее использования	Особенность схемы Обеспечение рекордной точечности регистрации (до $\delta = 1 \cdot 10^{-9}$)за счет реализации высоких импульсных плотностей мощности излучения. Короткая длительность достигается разрушением приемного торца световода (кварцевый или флюоритовый стержень) при контактировании с фронтом излучающей ударной волны. Ограничение на вес BB – плазменный поршень не должен выбить световод и изменить условие точечности, где излучатель- выходной торец световода. Трансляция излучения к выходному торцу за счет полных внутренних отражений на границе стержень-газ. Апертура излучателя определяется показателем преломления материала стержня. Визуализация тонких спектров обтекания моделей, движущихся со сверхзвуковыми	Лит -pa /5, 7- 13/
		S=1250 ед. ГОСТ, длительность экспозиции t	прохожления прухфарных сред	
		$= 0,2$ мкс, точечность схемы $\delta = 8,2 \cdot 10^{-9}$	прохождения двухфазных сред	























2.1Одновременная При пролете моделью измерительного /5, 25, регистрация участка осуществляется изображения в фотографирование теневого спектра 26/ обтекания и бесконтактная отраженном свете и теневая внешнетраекторная регистрация положений модели. Внешнетраекторная визуализация регистрация состоит в фотографировании при модели широкоугольными фотокамерами регистрации фотограмметри 1. Газоразрядный кумулятивный излучатель АФА-41, работающими в ждущем 2.Белый экран 3.Объект регистрации режиме, на фоне реперных марок базовой ческой 4. Аналоговая фотокамера с открытым системы координат. аналоговой Фотографирование происходит в момент аэрофотозатвором камерой с синхронного с полетом модели использованием срабатывания импульсных источников газодинамическ света. Последовательность их импульсных синхронизирующих команд на излучателей срабатывание источников 2.1.1 Регистрация в вырабатывается с помощью автоматической системы управления условиях аппаратурой оптического измерительного отсутствия трека на месте прямого комплекса, запускаемой от сигналов изображения базозадающего устройства, соответствующих пролету моделью изопанхроматическая пленка S=3300 ед. базового участка трассы. ГОСТ, объектив МРО-1, относительное Режимы работы и управление отверстие 1:8, длительность экспозиции t= регистрирующей аппаратурой в реальном 1,4 мкс, точечность схемы δ=1,272·10⁻⁸ масштабе времени осуществляется




2.2 Одновременная регистрация изображения в отраженном свете и теневая визуализация при регистрации цифровой камерой с использованием газодинамическ их импульсных излучателей	2 4. Г. Газоразрядный кумулятивный излучатель 2. Белый экран 3. Объект регистрации 4. Цифровая фотокамера с длительно открытым затвором камера Codak, 500 ISO, относительное отверстие объектива 1:4,5, выдержка t=4c, точечность схемы δ=1,272·10 ⁻⁸ Камера Canon, 1000 ISO, относительное отверстие объектива 1:8 выдержка t=8c, точечность схемы δ=1,272·10 ⁻⁸	Требуется осуществить: юстировку камеры, в процессе которой определяется и устанавливается эквивалентное фокусное расстояние, т. е. наилучшая фокусировка камеры, соответствующая наилучшему зрительному разрешению, с последующей фиксацией промежуточного положения фокусировки объектива в камере; фотограмметрическую калибровку камеры, в процессе которой осуществляется метрологическая аттестация камеры, при которой определяются индивидуальные фотограмметрические характеристики цифровой камеры, превращающие её в точный инструмент фотограмметрических измерений. Создан стереопост на базе камер: <u>Canon EOS-IDs</u> , разрешение 4063х2703 (11.4 Мп), фокусное расстояние 50 мм, формат кадра 23.8х35.8 мм; <u>Kodak DCS Pro</u> , разрешение 4500х3000 (13.5 Мп), фокусное расстояние 50 мм, формат кадра 23.7х35.5 мм.	/28/
---	---	--	------



5.1 Одновременная регистрация изображения в отраженном свете и теневого изображения двумя аналоговыми камерами с затворами с электроннооптическими преобразовател ями

- 1,2. Импульсный кумулятивный источник света с точечным излучателем.
- 3.Аналоговая камера с затвором с ЭОП
- 4. Диффузно-рассеивающий экран
- 5. Объект регистрации

объективы «Гранит», изопанхроматическая пленка S=1000 ед. ГОСТ относительное отверстие объектива 1:8 для теневой ветви регистрации и 1:4 для съемки в отраженном свете, длительность экспозиции t= 1 мкс, точечность схемы δ =1·10⁻⁶

Схема позволяет визуализировать различные фазы раскрытия поддонов модели и получить информацию о состоянии поверхности модели на участке промежуточной баллистики. При выстреле баллистической установки, в области дульного среза появляется светящаяся область, на которую ориентирован фотоприёмник, запускающий схему с необходимой задержкой. Точечный импульсный излучатель газоразрядный с ограничением распространения разряда сконструирован так, что с одной стороны, он обладает необходимыми светотехническими параметрами, достаточными для построения изображения модели в отражённом свете (яркость ≈6.2 Мсб, тело свечения 0.785 см²; при чувствительности фотоплёнки S_{0 8}=400-1000 ед.ГОСТ), а с другой, имеет достаточно малое тело свечения (Ø 10 мм). чтобы являться точечным источником теневой схемы и строить на матовом экране теневые спектры удовлетворительного качества. Излучатель приводится в действие накопителем энергии (Е=150 Дж), генерируя световой импульс, одновременно выдаётся синхроимпульс на открытие затворов фотокамер (ос-

/26,

31/

новную и дополнительную), одна из которых фотографирует теневое изображение, а другая – в отражённом свете. Экспонирование фотоматериала (время работы затвора)–0.5...1 мкс.

3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ П.2.

3.1. Энергетическое представление фотометрических величин

В /5 приведен алгоритм пересчета фотометрических величин в энергетические на основе формулы Уолша , описывающей кривую распределения чувствительности глаза с точностью до 1% в диапазоне 0,4 – 0,5 мкм:

$$\begin{split} V_{\lambda} &= 0,995 \Biggl(\frac{556}{\lambda [\text{HM}]} e^{1 - \frac{556}{\lambda [\text{HM}]}} \Biggr)^{220} + 0,105 \Biggl(\frac{610}{\lambda [\text{HM}]} e^{1 - \frac{610}{\lambda [\text{HM}]}} \Biggr)^{700} + \\ &+ 0,096 \Biggl(\frac{523}{\lambda [\text{HM}]} e^{1 - \frac{523}{\lambda [\text{HM}]}} \Biggr)^{2000} + \\ &0,055 \Biggl(\frac{475}{\lambda [\text{HM}]} e^{1 - \frac{475}{\lambda [\text{HM}]}} \Biggr)^{350}. \end{split}$$
(3.1)

В таблице 3.2 приведены расчетные значения плотности мощности излучения (Вт/см²) во всем спектре, в оптическом диапазоне, в видимом диапазоне, светимость (лм/см²), яркость (сб), кпд преобразования (лм/Вт) для абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой Т.

	~1	$2\mu m$	$0,8\mu m$	1 2		
7 10	σT ,	$\int m(\lambda, 1) d\lambda,$	$\int m(\lambda, I) d\lambda$	М, клм/см⁻	T ((D
1, кк	кВт/см ²	кВт/см ²	кВт/см ²		<i>L</i> , ксо	η, лм/Вт
1,9	0,073892	0,03275	0,001039	0,075571	0,02406	1,022729
2,0	0,09072	0,043609	0,001787	0,144991	0,046161	1,598227
2,1	0,110271	0,05688	0,00293	0,261911	0,083385	2,375167
2,2	0,132823	0,072865	0,004609	0,449029	0,142957	3,38065
2,3	0,15867	0,09188	0,006995	0,735492	0,234159	4,635363
2,4	0,188117	0,114249	0,010284	1,157443	0,368495	6,15278
2,5	0,221484	0,140312	0,014703	1,7582	0,559758	7,938258
2,6	0,259105	0,17042	0,020503	2,58831	0,82404	9,989408
2,7	0,301327	0,204934	0,027962	3,705303	1,179657	12,29661
2,8	0,34851	0,24423	0,037383	5,173259	1,64701	14,84393
2,9	0,401028	0,288696	0,049086	7,062186	2,248388	17,61019
3,0	0,45927	0,338731	0,063411	9,447264	3,007725	20,57017
3,1	0,523636	0,394747	0,080716	12,408296	3,950429	23,69639
3,2	0,594543	0,457171	0,101367	16,027652	5,102723	26,95795
3,3	0,672417	0,526439	0,125743	20,390909	6,491852	30,32478
3,4	0,757703	0,603002	0,154226	25,584928	8,145472	33,76645
3,5	0,850854	0,687323	0,187203	31,697179	10,091429	37,25335
3,6	0,952342	0,77988	0,225063	38,814882	12,357492	40,75728
3,7	1,062649	0,88116	0,26819	47,024218	14,971098	44,25186
3,8	1,182272	0,991667	0,316965	56,40961	17,959125	47,71288
3,9	1,311721	1,111914	0,371762	67,0531	21,347692	51,11841
4,0	1,45152	1,24243	0,432947	79,033793	25,161984	54,44898
4,1	1,602206	1,383754	0,500872	92,4274	29,426106	57,68757
4,2	1,764332	1,536442	0,575881	107,305858	34,16296	60,81955
4,3	1,93846	1,701056	0,658303	123,73703	39,394151	63,83264
4,4	2,12517	1,878176	0,748449	141,784474	45,139915	66,71675
4,5	2,325054	2,06839	0,84662	161,507291	51,419068	69,46387
4,6	2,538718	2,272302	0,953096	182,960019	58,248971	72,06789
4,7	2,766779	2,490524	1,068142	206,192593	65,645525	74,52441
4,8	3,009872	2,72368	1,192006	231,250344	73,623159	76,83062
4,9	3,268642	2,972405	1,324917	258,174047	82,194857	78,98510
5,0	3,54375	3,237345	1,467089	286,999999	91,372174	80,98765
5,1	3,835869	3,519154	1,618714	317,760125	101,165274	82,83915
5,2	4,145686	3,818496	1,779972	350,482116	111,582972	84,54113
5,3	4,473903	4,136044	1,951022	385,189577	122,632785	86,09699
5,4	4,821233	4,472478	2,132008	421,902193	134,320978	87,50919
5,5	5,188404	4,828487	2,323057	460,635911	146,65263	88,78180
5,6	5,576159	5,204763	2,524279	501,403123	159,631685	89,91908
5,7	5,985253	5,602014	2,735772	544,212861	173,261019	90,92563
5,8	6,416453	6,020931	2,957615	589,070983	187,542497	91,80632
5,9	6,870544	6,462228	3,189876	635,980374	202,477037	92,56623
6,0	7,34832	6,926617	3,432607	684,941135	218,064672	93,21057

Таблица 3.2 Световые характеристики излучения черного тела

6,1	7,850592	7,414812	3,685849	735,950772	234,304607	93,74462
6,2	8,378183	7,92753	3,949629	789,004379	251,195282	94,17369
6,3	8,931929	8,465485	4,223963	844,094823	268,734423	94,50308
6,4	9,512681	9,029394	4,508856	901,212909	286,919105	94,73805
6,5	10,121304	9,619971	4,804302	960,347556	305,745799	94,88377
7	13,61367	12,997661	6,43898	1285,768426	409,350024	94,44686
7,5	17,940234	17,146816	8,331669	1659,112049	528,211413	92,47995
8	23,22432	22,149957	10,473329	2077,687879	661,473377	89,46173
8,5	29,597754	28,082746	12,852278	2538,504117	808,183418	85,76678
9	37,20087	35,012261	15,455312	3038,473694	967,358705	81,67749
9,5	46,182504	42,995876	18,268523	3574,549641	1138,029176	77,40051
10	56,7	52,080691	21,277889	4143,809004	1319,264248	73,08305
10,5	68,919204	62,303531	24,469669	4743,500735	1510,188072	68,82698
11	83,01447	73,691043	27,830666	5371,069199	1709,98701	64,70039
11,5	99,168654	86,260164	31,348378	6024,009256	1917,863501	60,74509
12	117,57312	100,019947	35,011084	6700,450937	2133,222202	56,9896
12,5	138,427734	114,971029	38,807875	7398,302189	2355,397068	53,44523
13	161,94087	131,107417	42,728654	8115,781912	2583,821048	50,11571
13,5	188,329404	148,417248	46,764108	8851,274954	2817,979928	46,99890
14	217,81872	166,883704	50,905674	9603,318019	3057,407838	44,0885
14,5	250,642704	186,485865	55,145492	10370,585833	3301,68285	41,37597
15	287,04375	207,199488	59,476356	11151,877972	3550,422786	38,85079
15,5	327,272754	228,997713	63,891664	11946,106594	3803,28131	36,50198
16	371,58912	251,851677	68,385369	12752,285152	4059,944334	34,31824
16,5	420,260754	275,731055	72,951933	13569,518134	4320,126754	32,28833
17	473,56407	300,604533	77,58628	14396,991785	4583,569495	30,4013
17,5	531,783984	326,440196	82,28376	15233,965762	4850,036855	28,64690
18	595,21392	353,205866	87,040104	16079,765661	5119,314123	27,01510
18,5	664,155804	380,869382	91,851397	16933,776332	5391,205454	25,49669
19	738,92007	409,398823	96,714038	17795,435911	5665,531968	24,08303
19,5	819,825654	438,762701	101,624719	18664,230496	5942,130053	22,76609
20	907,2	468,930101	106,580393	19539,6894	6220,849857	21,53845
25	2214,84375	808,566965	158,088018	28580,900697	9099,299808	12,90425
30	4592,7	1200,937746	212,012714	37973,476605	12089,613691	8,26822
35	8508,54375	1629,02541	267,388319	47574,625827	15146,33105	5,59139
40	14515,2	2081,906097	323,697605	57309,095209	18245,49354	3,94821
45	23250,5437	2552,491586	380,64112	67133,732222	21373,362694	2,88740
50	35437,5	3036,072767	438,034294	77022,106238	24521,523794	2,17346
60	73483,2	4030,315762	553,729815	96927,395864	30858,769775	1,319042
70	136136,7	5048,585462	670,211737	116943,631215	37231,337541	0,859016
80	232243,2	6082,305285	787,188837	137029,603468	43626,10744	0,590026
90	372008,7	7126,515172	904,49763	157162,236076	50035,732593	0,422469
100	567000	8178,160029	1022,039358	177327,611391	56455,782041	0,312747
120	$1,17573 \cdot 10^{6}$	10296,478711	1257,589966	217723,984847	69316,773272	0,185182
150	$2,87043 \cdot 10^{6}$	13496,722186	1611,618381	278417,169019	88639,659032	0,096995
200	$9,072 \cdot 10^{6}$	18861,095184	2202,604623	379704,211596	120886,40929	0,041855
250	$2,21484 \cdot 10^7$	24243,966113	2794,15512	481070,394309	153158,35539	0,02172
300	$4,5927 \cdot 10^7$	29636,122058	3385,988026	582476,177199	185442,90901	0,012683

400	1,45152·10 ⁸	40434,393277	4570,0777	785347,16971	250030,93591	0,005411
500	3,54375·10 ⁸	51241,98428	5754,450054	988257,791308	314631,57953	0,002789
750	1,79402·10 ⁹	78277,289833	8715,87577	1,495604·10 ⁶	476155,27267	0,000834
1000	$5,67 \cdot 10^{9}$	105321,93158	11677,58429	$2,002989 \cdot 10^{6}$	637691,58686	0,000353

3.2. Эффективный радиус излучателя. Точечность

Понятия эффективного радиуса излучателя r_3 и точечности δ введены в /5/ как для параметров, характеризующих изменение размеров излучающей области: r_3 – радиус диска с площадью, равной проекции площади излучателя на плоскость, перпендикулярную к оси приемника на данный момент, δ - значение апертурных потерь, равное квадрату синуса угла, под которым в данный момент виден диск излучатель с радиусом r_3 . Т.е.

$$\delta(t) = r_{2}^{2} / (r_{2}^{2} + L^{2}), \qquad (3.2)$$

где L – расстояние от центра излучающей области до приемника.

Анализируя соотношения для точных выражений облученностей, создаваемых излучателями различной формы /7/, определяем, что ошибка, вносимая при описании ламбертова излучателя через г_э, отсутствует полностью в случае диска-излучателя и расширяющейся излучающей сферы, а для равнояркого цилиндра и прямоугольника ее можно определить из следующих формул :

$$f_1(h,r,L) = \left(\frac{hr}{hr + \pi L^2}\right) \cdot \frac{\pi}{r\left[\frac{h}{L^2 + 0.25h^2} + \frac{2arctg(0.5hL^{-1})}{L}\right]}$$
(3.3)

где h – высота цилиндра, r – его радиус.

$$f_2(a,b,L) = \left(\frac{ab}{ab + \pi L^2}\right) \cdot 2\pi \left[\frac{aarctg[b(L^2 + a^2)^{-0.5}]}{(L^2 + a^2)^{0.5}} + \frac{barctg[a(L^2 + b^2)^{-0.5}]}{(L^2 + b^2)^{0.5}}\right]^{-1} (3.4)$$

где а, 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); a f_2 - на расстояниях 8a (при b = 0,5a), 10a (при b = a), 16a (при b = 2a), 40a (при b = 5a).

δ и Т_{рад} измеряются для фонового сигнала и источника света. Используется фотодиодный пирометрический метод измерения /7/, при котором с постоянной времени не большей, чем 70 нс (опыты с регистрацией излучения лазера А2Х3-Пб.030, входящего в систему наведения промышленного изделия /35/) одновременно регистрируются амплитуды сигналов в разных спектральных диапазонах. По отношению сигналов за светофильтрами определяется T_{pag} , имеющая смысл цветовой температуры в области чувствительности пленки. По амплитуде сигнала U(t), T_{pag} (t) и известному расстоянию L определяется r_3 (t) и рассчитывается δ (t).

3.3 Алгоритм вычисления плотности поглощенных квантов по паспортным значениям фотоматериала в ед. ГОСТ

Выбор функции актиничности через плотность поглощенных фотоматериалом позволяет пересчитать квантов данным в энергетических единицах приводимые интегральные чувствительности в ед.ГОСТ для данного материала и рассчитать требуемые параметры подсветки для получения рабочих плотностей почернения при экспонировании в конкретной схеме регистрации. В основе подхода Эйнштейна о фотохимическом лежит закон эквиваленте, заключающемся в изменении одной молекулы при поглощении одного кванта. Принимается, что процесс образования скрытого изображения делится на этап фотолиза и агрегации, причем фотолиз протекает в две стадии, на первой из которых происходит освобождение электронов и их задержка на центрах светочувствительности, а на второй – на задержа на депрат евсю урего постя, а на второп, нейтрализация электронов мигрирующими по кристаллу ионами $Ag^+ c$ образованием металлического серебра Ag^0 (AgHal + hv $\rightarrow Ag^0$ + Hal = Hal⁻ + hv \rightarrow Hal + e⁻; Ag^+ + e⁻ $\rightarrow Ag^0$) /36/. В качестве исходных данных используются: условия проведения экспонирования фотоматериалов по ГОСТ 2817-50 и ГОСТ 10691-63 /37,38/, спектральная чувствительность фотоматериала, величины S_{0.85}, S_{0.2} в ед.ГОСТ, и коэффициент контрастности $\gamma(\lambda)$.

Для данного фотоматериала определяется его относительная спектральная чувствительность как $k_{1\lambda} = (S_{\lambda max})^{-1}/(S_{\lambda})^{-1}$, где $S_{\lambda} - (cm^2/9pr)$ – значение спектральной чувствительности данного фотоматериала на длине волны λ . Рассчитываем $k_{2\lambda}$ и $k_{3\lambda}$ для фильтров CC1 (3мм) и C3C15 (3мм), образующих с источником света с T=2850 К искусственный свет для экспонирования по ГОСТ 2817-50 либо получаем суммарную относительную спектральную кривую по кривой относительной монохроматической освещенности, создаваемой искусственным солнечным светом по ГОСТ 2817-50. Вычисляем предельную плотность потока мощности, поглощаемого фотослоем:

$$M(\lambda,T) = (1-r_{\lambda}) \cdot \int_{\lambda_{1}}^{\lambda_{2}} \frac{2\pi h c^{2} k_{1\lambda} k_{2\lambda} k_{3\lambda}}{\lambda^{5}} \frac{d\lambda}{\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1} \cdot , (3.5)$$

где r_{λ} - коэффициент отражения , λ_1 , λ_2 – граничные длины волн для данного фотоматериала.

Определяем температуру T_{pag} , соответствующую данной плотности мощности АЧТ в спектральном диапазоне λ_1 - λ_2 , ($T_{pag} < T_0$ (2850 K)).

Для данной T_{pag} определяем предельно возможную создаваемую освещенность, M (лк), определяемую светностью источника (лм/м²).

По данной $S_{0,85}$ (ед.ГОСТ) определяем эффективное время экспонирования t_3 как $t_3 = (10/S_{0,85})$ М (поскольку апертурные потери не учитывались, это время много меньше 1/20 с - реального времени экспонирования).

Зная t_3 , определяется плотность числа поглощенных квантов данным фотоматериалом $N_{0,85}$ (1/см²), приводящая к получению плотности почернения до уровня 0,85:

$$N_{0,85} = (1 - r_{\lambda}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c \ k_{1\lambda} k_{2\lambda} k_{3\lambda} t_{\beta}}{\lambda^4} \frac{d\lambda}{\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1}$$
(3.6)

Аналогично вычисляется $N_{0,2}$ (здесь t_3 определяется как $(1/S_{0,2})M$) и с учетом коэффициента контрастности $\gamma(\lambda)$ определяются критические величины $N_{0,5}$, N_1 , N_2 , задающие рабочий диапазон экспонирования данного фотоматериала.

На рис.3.1, 3.2 приведены плотности числа поглощенных квантов для ортохроматической пленки с относительным спектральным распределением фототехнической пленки ΦT-41 И изопанхроматической с относительным спектральным распределением аэрофотопленки изопанхром 13, соответственно /46/. Четыре кривых на соответствуют каждом графике экспонированию данного фотоматериала до уровня плотности почернения 0,5 (нижняя кривая) ; 0,85; 1; 2 (верхняя).

Рис.3.1. Кривые актиничности для ортохроматической пленки

Рис.3.2. Кривые актиничности для изопанхроматической пленки

3.4. Формулы расчета схем теневого и силуэтного фотографирования

3.4.1. Прямотеневое фотографирование на открытую высоко(низко) чувствительную пленку.

3.4.1.1. Факторы, определяющие качество фотоизображений для схем 3.1-3.4.

Требования к качеству получаемого фотоизображения определяются совместным учетом особенностей конкретной схемы критериями физиологической регистрации И оптики. Теория фраунгоферовой дифракции объясняет невозможность получения совершенного изображения – обеспечение нулевой освещенности интерференции волн, пришедших от данной точки объекта в любой другой точке плоскости изображения. Из этого, в частности, следует, что существует разрешающий порог (острота зрения), определяющий минимальный размер воспринимаемого глазом объекта. Поскольку угловой радиус в первого темного кольца в дифракционной картине (результат Эйри для дифракции на круглом отверстии) определяется соотношением $\sin\theta = 1.22\lambda/d$, где d – диаметр линзы, λ - длина волны /47/, то подставив в это выражение диаметр зрачка, можно получить теоретический предел разрешения для глаза. Для d = 2,5 мм (средний диаметр зрачка в дневное время /39/) и длины волны максимальной чувствительности среднего человеческого глаза в дневное время, предельный угол разрешения равен 56". При рассмотрении изображения точечного объекта с расстояния наилучшего зрения (25 см), линейный предел разрешения А составит чуть менее 0,1 мм. Отчетливо будут различаться объекты, разделенные расстоянием 0,2 мм. Эффективность зрительного восприятия /40/ зависит также от порога контрастной чувствительности /50/ FC_{пор} = 0,06 (здесь, физиологический контраст FC = $(L_2-L_1)/L_1$, где L_1 - яркость объекта регистрации, L_2 - яркость окружающего его фона, сопоставляется с контрастом фотографическим $\delta = D_1 - D_2$, где D_1, D_2 – плотности почернения изображения соседних объектов) и, следовательно, возможно при $\delta > 0,06$. Из-за сдвига изображения, например в случае защитных стекол /5/, его резкость изменяется, что описывается функцией размытого контраста – переходной зоной от яркости объекта к яркости фона. В результате пороговый контраст увеличивается (этот эффект, в частности, ограничивает предел допустимого увеличения при рассматривании изображения) на величину $\Delta FC = FC_0 \cdot \text{const} \cdot l_x^3$, где const – коэффициент, зависящий от вида пограничной кривой, FC₀- контраст изображения в случае отсутствия размытости, l_x – ширина полосы размытия. Опытные данные /41/ по зависимости между контрастом визуально воспринимаемого объекта и его угловыми размерами показывают, что,

57

начиная с б≈0,3, разрешающий порог практически не изменяется и составляет около 150". Таким образом, с учетом того, что плотность вуали составляет примерно D= 0,2, минимальная рабочая плотность почернения негатива должна составлять D=0,5. Важным фактором, влияющим на качество изображения, является его смаз (сдвиг), вызванный смещением объекта во время его экспонирования на пленку. В данных схемах (без использования оптики) 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 гидродинамического процесса имеют различные размеры и скорости, например, головная УВ перед телом и турбулентные пузырьки 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 $t \approx A \cdot c^{-1} \cdot L^{-1} \cdot (L-l)$, где L – расстояние от источника до объекта регистрации, l – расстояние от объекта регистрации до пленки, что дает t ≈ 0,5-0,6 мкс. Для зон в окрестности границы летящего тела и его носовой части требования жестче и для типовой скорости (M=3) длительность экспозиции должна быть примерно 0,2 мкс. С ростом коэффициента увеличения L·(L-l)⁻¹ при той же точечности источника и его длительности нерезкость изображения возрастает. В /7/ 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 требуется осуществить обтекания модели фотограмметрические применением исследования с десятков дополнительных подсветок, и в которых задействуются баллистические установки различного калибра, с различными методиками отделения поддона, многоразовый 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 получения качественного изображения) увеличивать яркость (температуру) источника, чтобы варьировать размером тела излучения (точечностью) и/или длительностью. Соответствующие зависимости входят в систему

58

уравнений, определяющих дополнительные требования к расчету конкретной схемы регистрации (см. далее).

3.4.1.2. Расчет схем прямотеневого фотографирования на открытую высоко(низко) чувствительную пленку.

Для осуществления схемы должны соблюдаться условия:

Внешний фон:
$$Et \le S_{0,2}^{-1}$$
, (3.7)

где: Е – освещенность, t – время в течение, которого пленка открыта

Фон процесса:

ONTUMYM:
$$N_{0,2} \ge \int_{\lambda_1 t_p}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_p)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_p}{\exp(hc/\lambda kT_p) - 1}$$
, (3.8)

рабочий:
$$N_{0,2} \leq \int_{\lambda_1 t_p}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_p)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_p}{\exp(hc / \lambda kT_p) - 1} \leq N_{0,5},$$
 (3.9)

где: λ_1 , λ_2 – граничные длины волн области чувствительности данного фотоматериала, δ_p – точечность фонового излучателя (1.2). Требования к источнику:

оптимум:

$$N_{0,85} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_u}{\exp(hc/\lambda kT_u) - 1} \leq N_1, \quad (3.10)$$

рабочие:

$$N_{0,5} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_u}{\exp(hc / \lambda k T_u) - 1} \leq N_2, \qquad (3.11)$$

дополнительные ограничения, налагаемые условиями опыта:

по точечности: $\delta \leq [A(L-l)/2l]^2/[(A(L-l)/2l)^2+L^2],$ (3.12)

где А - минимально разрешаемый объект (например, 0,1 мм – предельное разрешение невооруженного человеческого глаза), L – расстояние от источника до пленки, 1 – расстояние от объекта (процесса) регистрации до пленки (рис.3.3);

по длительности t_и: $t_u \le 1,2(L-l)l^{-1}A/v_p \approx A/v_p, (3.13)$ где v_p – характерная скорость объекта (процесса) регистрации.

Если t_{μ} и t_{p} лежат в области, где не выполняется закон взаимозаместимости для данного фотоматериала, процесс расчета начинается по новому циклу с определением новых значений $N_{0,2}$ - $N_{3.}$ Отметим, что, как правило, это не требуется, поскольку при временах освещения меньших 10 мкс закон взаимозаместимости выполняется /52/; время работы источника для данной схемы (3.13) на порядок ниже, а самосвечение регистрируемого процесса в случае превышения этой длительности, для рассматриваемых фотоматериалов, приведет к незначительному изменению величин актиничности, что в итоге будет лежать в пределах ошибки вычисляемой температуры.

расстояние, мм

Рис.3.3. Критические значения точечности для схемы с L=2500 мм, A=0,1 мм (нижняя кривая), A=0,2 мм (верхняя).

В случае большой площади фотопленки уровни освещенности периферийных зон отличаются от центральной, напротив которой расположен точечный источник света. Точечность для участков, расположенных на расстоянии х от центра, будет определяться как:

$$\delta'(x) = L\sqrt{L^2 + x^2} \cdot \left[\frac{1}{L^2 + x^2} - \frac{1}{L^2 + r_u^2 + x^2}\right], \quad (3.14)$$

где r_и – радиус источника света.

δ' отличается от δ_{μ} незначительно (см. рис.3.4). Например, при $\delta_{\mu} = 10^{-6}$ (r_µ = 2,5 мм, L = 2,5 м) δ' для зон, расположенных с шагом 100мм от центра, меняется следующим образом: δ'(100) = 9,976·10⁻⁷, $δ'(200)=9,905\cdot10^{-7}$, $\delta'(300)=9,788\cdot10^{-7}$, $\delta'(400)=9,628\cdot10^{-7}$, $\delta'(500)=9,429\cdot10^{-7}$. С ростом L, $\delta' \to \delta_{\mu}$. В комбинации $r_{\mu} = 5$ мм, L = 5м, $\delta'(500)=9,852\cdot10^{-7}$. При этом разница по требуемой температуре источника в случае ортохроматической пленки менее 0,5 % (при $t_{\mu} = 1$ мкс, T = 24701 K для центра пленки и T = 24811 K для периферийной зоны, отстоящей на 0,5 м).

Рис.3.4. Отношение δ_{μ}/δ' (верхняя кривая - для источника радиусом 2,5мм, расположенного на расстоянии 2,5м от центра пленки; нижняя - для источника 5мм на расстоянии 5м).

На рис.3.5-3.22 приведены расчетные справочные графики для требуемых параметров источников света (яркостная температура, длительность) для получения плотностей почернения 0,5 (нижняя кривая); 0,85 (средняя); 2 (верхняя) при коэффициентах точечности $5\cdot10^{-6}$ (рис.3.5, 3.11, 3.17), 10^{-6} (рис.3.6, 3.12, 3.18), $5\cdot10^{-7}$ (рис.3.7, 3.13, 3.19), 10^{-7} (рис.3.8, 3.14, 3.20), $5\cdot10^{-8}$ (рис.3.9, 3.15, 3.21), 10^{-8} (рис.3.10, 3.16, 3.22) для изопанхроматической пленки с весовым спектром «изопанхром-13» чувствительностью 100 (рис. 3.5-3.10), 500 (рис.3.11-3.16), 1000 (рис.3.17-3.22) ед.ГОСТ. На рис.3.23-3.28 приведены справочные графики для требуемых параметров источников света (яркостная температура, длительность) для получения плотностей почернения 0,5 (нижняя кривая); 0,85 (средняя); 2 (верхняя) при коэффициентах точечности $5\cdot10^{-6}$ (рис.3.23, 3.26), 10^{-6} (рис.3.24, 3.27), $5\cdot10^{-7}$ (рис.3.25, 3.28), для ортохроматической пленки с весовым

спектром «ФТ-41» чувствительностью 1,9 (рис. 3.23-3.25), 6,5 (рис.3.26-3.28)ед.ГОСТ.

Рис.3.5. Изопанхром, 100ед.ГОСТ, б=5·10⁻⁶

Рис.3.6. Изопанхром, 100ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁶

Рис.3.8. Изопанхром, 100ед.ГОСТ, δ =1·10⁻⁷

Рис.3.10.Изопанхром, 100ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁸

Рис.3.11.Изопанхром, 500ед.ГОСТ, б=5·10⁻⁶

Рис.3.12.Изопанхром, 500ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁶

Рис.3.13. Изопанхром, 500ед.ГОСТ, δ =5·10⁻⁷

Рис. 1.14. Изопанхром, 500ед.ГОСТ, δ =1·10⁻⁷

Рис.3.15. Изопанхром, 500ед.ГОСТ, δ =5·10⁻⁸

Рис.3.16. Изопанхром, 500ед.ГОСТ, δ =1·10⁻⁸

Рис.3.18. Изопанхром, 1000ед.ГОСТ, δ =1·10⁻⁶

Рис.3.19. Изопанхром, 1000ед.ГОСТ, δ =5·10⁻⁷

Рис.3.20. Изопанхром, 1000ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁷

Рис.3.21. Изопанхром, 1000ед.ГОСТ, б=5·10⁻⁸

Рис.3.22. Изопанхром, 1000ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁸


Рис.3.23. Ортохром, 1,9 ед.ГОСТ, $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$



Рис.3.24. Ортохром, 1,9 ед.ГОСТ, δ=1·10⁻⁶



Рис.3.25. Ортохром, 1,9 ед.ГОСТ, δ =5·10⁻⁷



Рис.3.26. Ортохром, 6,5 ед.ГОСТ, δ=5·10⁻⁶



Рис.3.27. Ортохром, 6,5 ед.ГОСТ, б=1·10⁻⁶



Рис.3.28. Ортохром, 6,5 ед.ГОСТ, δ =5·10⁻⁷

3.4.1.3. Прямотеневая схема с использованием защитного стекла.

Для предотвращения попадания частиц, образующихся во время проведения соответствующих опытов, пленка может защищаться прозрачной плоскопараллельной стенкой. При расчете параметров источника в формулах под интегралом добавляется - член κ_{λ} , учитывающий спектральное пропускание защитной стенки.

Фон процесса: оптимум:
$$N_{0,2} \ge \int_{\lambda_1 t_p}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_p)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} \kappa_\lambda d\lambda dt_p}{\exp(hc/\lambda kT_p) - 1},$$
 (3.15)

рабочий:

$$N_{0,2} \leq \int_{\lambda_1 t_p}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_p)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} \kappa_\lambda d\lambda dt_p}{\exp(hc/\lambda kT_p) - 1} \leq N_{0,5}. \quad (3.16)$$

Требования к источнику:

оптимум:

$$N_{0,85} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} \kappa_\lambda d\lambda dt_u}{\exp(hc / \lambda k T_u) - 1} \leq N_1, \quad (3.17)$$

рабочие:

$$N_{0,5} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)}{\lambda^4} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} \kappa_\lambda d\lambda dt_u}{\exp(hc / \lambda k T_u) - 1} \leq N_2 .$$
(3.18)

На рис. 3.29-3.31 приведены расчетные справочные графики для параметров источника света, необходимые для получения плотностей почернения 0,5 (нижняя кривая); 0,85; 2 (верхняя кривая) ортохроматической пленкой со спектральным распределением «ФТ-41» чувствительностью 6,5 ед.ГОСТ при точечности 5·10⁻⁶ (рис.3.29), 10⁻⁶ (рис.3.30), 5·10⁻⁷ (рис.3.31) при использовании миллиметровой защитной пластины из плексигласа ГОСТ 17622-73.



Рис.3.29. Ортохром, 6,5 ед. ГОСТ, δ =5·10⁻⁶, плексиглас



Рис.3.30. Ортохром, 6,5 ед. ГОСТ, δ =1·10⁻⁶, плексиглас



Рис.3.31. Ортохром, 6,5 ед. ГОСТ, $\delta = 5 \cdot 10^{-7}$, плексиглас

3.4.2. Получение теневых изображений в отраженном свете с помощью камеры в схемах 3.1.1-3.1.3.

фотограмметрических При проведении измерений на аэробаллистических трассах с целью определения траекторных параметров испытываемых изделий в режиме их свободного полета возникает необходимость в различных схемах регистрации, в том числе и в одновременной регистрации прямого и теневого изображений изучаемого объекта. Поскольку сам объект может содержать реперные марки, (поверхность модели покрашена белой матовой эмалью и нанесены черные марки), либо не содержать их, коэффициент отражения может меняться в широких пределах, и требования к источнику по получению теневого изображения на белом экране для отдельных случаев уступают по жесткости требованиям по получению контрастного, прямого несмазанного изображения.

3.4.2.1. Факторы, определяющие качество фотоизображений для схем 1.1-1.4.

Импульсное фотографирование изделий на траектории движений осуществляется на стереопостах. Исходной информацией для определения траекторных параметров служат результаты измерения полученных фотонегативов. В результате точность определения АДХ

напрямую зависит от точности измерения негативов, а последняя от их качества (измерительных и изобразительных свойств). Измерительные свойства фотонегативов определяются величинами, характеризующими нарушение способности давать изображение геометрически подобное регистрируемому предмету (ортоскопии). Меры нарушения ортоскопии (дисторсия объектива, деформация пленки, смещение точек изображения из-за неравномерного выравнивания пленки в процессе экспонирования) оцениваются количественно и учитываются при измерениях. В условиях закрытой аэробаллистической трассы это сводится к периодической юстировке стереопостов и использованию камер с равномерно нанесенной сеткой из крестов на внутренней стороне выравнивающего стекла для получения соответствующих изображений по полю негатива во время экспонирования пленки в опыте. В качестве требования к источникам света, с помощью которых строится изображения, это сводится к необходимости получения плотности почернения, превышающего вуаль для всего поля негатива при срабатывании всех источников, работающих на камеру данного стереопоста в условиях существующего фона (расстояния от источника стены трассы, и ее отражательных свойств). В случае ло одновременного получения теневого изображения это требование выполняется автоматически, поскольку сводится к основному изображения требованию построения на белом экране. с коэффициентом отражения 0,7-0,9, расположенном рядом относительно оси полета модели и также служащем фоном при построении сетки из крестов выравнивающего стекла.

Изобразительные свойства характеризуются негативов контрастом изображения, разрешающей способностью, нерезкостью, величиной допустимого сдвига изображения и зависят от ряда факторов. Требования, связанные с контрастом изображения, можно суммировать следующим образом. Визуальное восприятие изображения возможно при превышении порога контрастной чувствительности зрения п.п 3.4.1.1, т.е. минимальная плотность негатива должна превышать плотность вуали не менее, чем на 0,3. Фотографическая широта используемой фотопленки (проекция прямолинейного участка характеристической кривой фотопленки) (D2-D1) cos(arctgy), где ү коэффициент контрастности, должна превышать интервал яркостей объектов съемки lg(pmax/pmin) /42/. Оптимальная плотность почернения негатива 0,8-1. Допустимая величина сдвига изображения $\Delta_{\text{поп}}$ минимально разрешаемый превышает размер изображения регистрируемого объекта по направлению сдвига не более чем в 1,2 раза /43,44/.

Размер изображений наименьших объектов, которые надо измерять по снимку, определяется разрешающей способностью, параметрами объектива и масштабом съемки. Фокусное расстояние объектива определяет масштаб изображения т (отношение линейных размеров изображения к линейным размерам объектива) объекта на пленке m= f/l, где f – фокусное расстояние объектива, l – расстояние от аппарата до объекта съемки. Применение короткофокусных объективов, обладающих большим углом изображения (широкоугольных), приводит к укрупнению масштаба изображения предметов, расположенных ближе к аппарату, и уменьшению масштаба изображения удаленных объектов. Широкоугольные объективы (применяемые на аэробаллистических трассах) усиливают линейную перспективу и в некоторых случаях могут дать искаженное представление о предмете. Наибольшая разрешающая способность, а следовательно, и резкость изображения, может быть получена при относительном отверстии 1:5,6 – 1:8. При большем диафрагмировании, так же как и при меньшем, резкость ухудшается. В общем виде определение диафрагмы объектива, необходимой для получения заданных границ резкоизображаемого пространства при заданном фокусном расстоянии объектива, производится по формуле $\emptyset = 2 \cdot \pi \cdot z' \cdot l_1 \cdot l_2 / f^2 \cdot (l_2 - l_1)$, где z' - диаметр кружкарассеяния (≈1/30 мм), l₁ – расстояние от аппарата до передней границы резкоизображаемого пространства; l₂- до задней границы /45/.

Разрешающая способность системы объектив-пленка определяется на основании эмпирической зависимости: $R_{\Sigma}^{-1} = R_0^{-1} + R_{\pi}^{-1}$, где R_{Σ} - суммарная разрешающая способность, R_0 , R_{π} - соответственно, разрешающие способности объектива и пленки /5/. Для большинства объективов, применяемых в аэрофотосъемке (с углом поля зрения выше 100⁰), разрешающая способность по центру выше 37 мм⁻¹ (по краю – выше 10мм⁻¹) при фотограмметрической дисторсии не более ±25мкм. Максимальная разрешающая способность аэрофотопленок уменьшается с увеличением светочувствительности (250 мм⁻¹ при $S_{0,85}$ =100 (изопанхром, тип 18), 70 мм⁻¹ при $S_{0,85}$ =2000 (изопанхром, тип 13)). Расчетная суммарная разрешающая способность фотографической системы объектив+пленка, применяемой во ВНИИЭФ (объектив МРО-2, пленки тип 42,49), составляет не менее 40 мм⁻¹ (для центра поля зрения), 11 мм⁻¹ (для крайней зоны). Реальная разрешающая способность R может быть определена различными способами с разной относительной ошибкой – по мире (наиболее точный метод), по ширине тонких линий, по ширине пограничных линий, по скачку яркости, по оптимальному увеличению (наименее точный метод). При этом разрешающая способность снимка получается не ниже расчетной по

крайней зоне. Из понятия разрешающей способности следует зависимость для определения минимальной ширины изображения объекта – размеров деталей объекта, которые будут разрешаться на снимке, -

 $\Delta = 1/2 R$ (46 мкм для аэрофотоаппарата AФA-41/10). Т.е. условие максимального использования изобразительного свойства камеры при наличии сдвига изображения запишется как:

$$1,2/2R \geq \Delta_{\text{don}}; \Delta_{\text{don}}/mv \geq t,$$
 (3.22)

где v – скорость движения регистрируемого объекта.

В частности, для критических режимов испытаний в условиях аэробаллистического тира ВНИИЭФ (m = 55⁻¹, v = 2 км/с) перемещение объекта во время экспонирования пленки не приводит к ухудшению изобразительных свойств фотонегатива при длительности экспонирования меньшей или равной 1,52 мкс.

3.4.2.2. Расчет схем для получения теневого изображения в отраженном свете модели, покрашенной белой эмалью и с нанесенными черными марками.

Для осуществления схемы должны соблюдаться условия:

Фон процесса:
$$N_{0,2} \ge \int_{\lambda_1 t_p}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_p)\kappa_\lambda}{\lambda^4 o^2} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_p}{\exp(hc/\lambda kT_p) - 1},$$
 (3.23)

где: λ_1, λ_2 – граничные длины волн области чувствительности данного фотоматериала, δ_p – точечность фонового излучателя, k_λ - спектральное пропускание объектива (расчетное интегральное пропускание объектива аэрофотокамеры АФА 41/10 для k_λ , приведенного в /43/, составляет 0,34), о - диафрагма (знаменатель в величине относительного отверстия объектива).

Требования к источнику:

оптимум:

$$N_{0,85} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)\kappa_\lambda \rho_m}{\lambda^4 o^2} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_u}{\exp(hc/\lambda kT_u) - 1} \leq N_1 \quad (3.24)$$

рабочие:

$$N_{0,5} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)\kappa_\lambda \rho_m}{\lambda^4 o^2} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_u}{\exp(hc / \lambda k T_u) - 1} \leq N_{2, (3.25)}$$

где ρ_m – средний коэффициент отражения от поверхности модели.

Дополнительные ограничения, налагаемые требованиями получения качественного изображения, определяются разрешающей способностью аппаратуры, контрастом и допустимым смазом изображения (3.5.3.1):

- оптическая плотность вуали не должна превышать 0,2;

- минимальная плотность негатива должна превышать плотность вуали не менее чем на 0,3;

- максимальная плотность негатива должна находиться в пределах 0,8 – 1;

- длительность подсветки не должна превышать 1,2·f/v²RL, где f – фокусное расстояние объектива, v – скорость объекта регистрации, R – периферийная суммарная разрешающая способность, L – расстояние до регистрируемого объекта.

На рис.3.32-3.34 приведены расчетные справочные графики для параметров подсветки, необходимые для получения плотностей почернения 0,5 (нижняя кривая); 0,85; 2 (верхняя) при точечности 10⁻⁵ (рис.3.32), 5·10⁻⁶ (рис.3.33), 10⁻⁶ (рис.3.34) на изопанхроматической аэрофотопленке чувствительностью 3000 ед.ГОСТ с весовым распределением «изопанхром, тип 49» при съемке с помощью объектива МРО-2 с диафрагмой 8.



Рис.3.32. Изопанхром, 3000 ед.ГОСТ, Ø=8, МРО-2, $\delta = 10^{-5}$



Рис.3.33. Изопанхром, 3000 ед.ГОСТ, Ø=8, МРО-2, $\delta = 5.10^{-6}$



Рис.3.34. Изопанхром, 3000 ед.ГОСТ, Ø=8, МРО-2, $\delta = 10^{-6}$

- 3.4.3. Получение теневых изображений в проходящем свете с помощью камеры с ЭОП.
- 3.4.3.1. Факторы, влияющие на качество изображений в схемах 3.1-3.3.

Использование электронно-оптических преобразователей (ЭОП) для фоторегистрации прежде всего исключает фактор влияния естественной радиации, что позволяет широко использовать данные измерительных системы в практике опытов на комплексах. Функциональная работа ЭОП описана в работе авторов /5/ и там же приведены характерные фотографии течений, полученные с помощью камер с затвором с ЭОП и дающие представления о возможностях этого вида съемки для получения теневых картин.

Параметры, характеризующие электронно-оптические системы, включают: размер рабочего кадра, пространственное статическое и динамическое разрешение, временное разрешение, коэффициент усиления, спектральный диапазон. Использование фотопленки вместо ПЗС-матрицы на данном этапе теоретически позволяет реализовать электронно-оптические лучшим системы с параметрами (пространственное разрешение не хуже 25 мм⁻¹, формат кадра не менее 37мм), чем у цифровой аппаратуры отечественного или зарубежного производства (разрешение до 20 мм⁻¹, размер кадра до 20мм) /47-49/. На измерительном комплексе ВНИИЭФ применяются камеры с ЭОП

(«ЭПОС»), характеризующиеся размером рабочего кадра 26 мм, спектральной чувствительностью 0,4-0,8мкм, временным разрешением 1,5-2,5 мкс, усилением по яркости 3-10 /46/.

Суммарная разрешающая способность в данной схеме регистрации уменьшается за счет использования в оптической схеме люминофорного экрана и за счет того, что динамическая характеристика оптической системы ухудшается примерно в полтора раза по сравнению с пространственным разрешением, определяемым суммой $\Sigma(1/R^2)$ элементов оптической схемы /5,26/.

В силу этого, данная схема малоэффективна для регистрации объектов, имеющих относительно малую скорость (до M=2,5), т.к. не позволяет «увидеть» не только тонкие спектры обтекания, но и головную и хвостовую УВ. Визуализация оптических неоднородностей становится возможной с ростом числа Маха М (увеличивается давление за фронтом и протяженность зоны повышенной плотности), с ростом коэффициента увеличения и с уменьшением знаменателя масштаба изображения. Минимальный разрешаемый размер A_{min} в данной схеме равен:

$$A_{\min} = \frac{1 \cdot d}{((L-1) \cdot f \cdot R_{\Pi UH})}, \qquad (3.29)$$

где d - расстояние от камеры до рассеивающего экрана, f – фокусное расстояние объектива, L,l – расстояние от источника и от объекта регистрации до экрана, соответственно, $R_{дин}$ – 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 $100R_0$) для определения конфигурации течения ПВ, вторичных УВ, зоны отрыва головной УВ, зон кумуляции при столкновении потоков, течений при срабатывании капсюлей и т.п. Использование схемы целесообразно в условиях аэробаллистического тира для получения теневых картин внутри тира при максимальных режимах испытаний, когда регистрация на открытую пленку невозможна, и вне тира (в любое время суток) для осуществления регистрации на участке от среза ствола до отсекателя поддонов.

В случае визуализации малых высокоскоростных осколков существенным становится длительность экспонирования фотослоя. Задачи, связанные с осколочной тематикой требуют регистрировать объекты размером до 4-8мм на скоростных режимах до 10-15 км/с. Допустимый сдвиг изображения при скорости осколка порядка 10 км/с требует уменьшения времени экспонирования, что может быть

достигнуто за счет уменьшения длительности источника света. В схеме 3.2 экспонирование пленки осуществляется точечным источником света с длительностью импульса в несколько раз меньшим времени работы затвора ЭОП. Инерционность работы источника света и оптикоэлектронной системы учитываются задаваемой блоком задержки уставкой 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:

 $\Delta \le 1, 2 \cdot 1 \cdot (L/(L-l)) \cdot m^{-1} \cdot v \cdot t \quad , \tag{3.30}$

в то время как для систем ЭПОС с выдержкой t = 1,5 мкс на режимах испытаний v=10 км/с величина смаза может достигать 0,15 мм (m=100) при размере самого изображения 0,08 мм, что недопустимо. (При остроте зрения в 0,1 мм и масштабе съемки 1:40 длительность экспозиции должна составлять \approx 0,4 мкс для регистрации объекта 4 мм с v=10 км/с). Динамическая разрешающая способность системы должна обеспечивать на пленке кружок нерезкости в два раза меньший, чем сдвиг изображения, т.е. 0,05 мм, т.к. расстояние между двумя контрастными линиями в изображении объекта должно быть различимо глазом. Т.е. динамическое разрешение для задач осколочной тематики должно составлять не менее 20 мм⁻¹.

3.4.3.2. Расчет схем для получения теневого изображения в проходящем свете в схемах 3.1-3.3.

Использование этой схемы возможно в двух режимах, определяемых характерной скоростью процесса и уровнем фона: а) длительность регистрации определяется временем работы высокоскоростного затвора, б) время экспозиции определяется длительностью работы импульсного источника ($t_{\mu} < t_{3}$), где t_{μ} - длительность источника, t_{3} - длительность работы затвора. Соответственно, различными будут и условия, определяющие требования к фону и подсветке. Для случая а) требования запишутся как:

фон процесса:

оптимум:
$$N_{0,2} \ge \int_{\lambda_1 t_3}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_3)\eta_\lambda \kappa_\lambda U\eta_{\cdot_3}\eta_l}{\lambda^4 o^2(hc\tau_\lambda/\lambda)} \cdot \frac{2\pi ck_{1\lambda}d\lambda dt_p}{\exp(hc/\lambda kT_p) - 1},$$
 (3.31)

рабочий: $N_{0,2} \leq \int_{\lambda_1 t_2}^{\lambda_2} \frac{\delta_p(t_3) \eta_\lambda \kappa_\lambda U \eta_{\cdot_3} \eta_l}{\lambda^4 o^2 (hc \tau_\lambda / \lambda)} \cdot \frac{2\pi c k_{1\lambda} d\lambda dt_p}{\exp(hc / \lambda k T_p) - 1} \leq N_{0,5}$ (3.32)

для теневой регистрации:

$$N_{0,5} \leq \int_{\lambda_{l}t_{j}}^{\lambda_{2}} \frac{\delta_{u}(t_{u})\eta_{\lambda}\kappa_{\lambda}U\eta_{j}\eta_{l}}{\lambda^{4}o^{2}(hc\tau_{\lambda}/\lambda)} \cdot \frac{2\pi ck_{1\lambda}d\lambda dt_{u}}{\exp(hc/\lambda kT_{u})-1} \leq N_{2} \quad (3.33)$$

где $\eta_{\mathfrak{I}}$ – доля квантов, поглощаемых полупрозрачным экраном на котором строится изображение, η_{λ} (Ac/част.) – пересчитанная спектральная кривая поглощения материалом фотокатода (для расчетов берется кривая фотоэлектрического выхода (A/BT) световой мощности при облучении фотокатодов /47/, U – ускоряющее напряжение, η_{l} - кпд люминофорного покрытия, τ_{λ} - спектральное распределение в излучении люминофорного покрытия, о – знаменатель величины относительного отверстия (диафрагма).

Для случая б) наиболее интересного, с точки зрения регистрации высокоскоростных процессов, требования для теневой регистрации запишутся как:

$$N_{0,5} \leq \int_{\lambda_1 t_u}^{\lambda_2} \frac{\delta_u(t_u)\eta_\lambda \kappa_\lambda U\eta_{\cdot_3}\eta_l}{\lambda^4 o^2(hc\tau_\lambda/\lambda)} \cdot \frac{2\pi ck_{1\lambda} d\lambda dt_u}{\exp(hc/\lambda kT_u) - 1} \leq N_2 \quad (3.34)$$

В случае использования люминофорного экрана с узким спектральным диапазоном и максимумом светоотдачи в зеленой области (ЭОП-15 /50/), формула для требований к источнику может быть упрощена, поскольку в качестве функции актиничности может быть взята спектральная чувствительность фотоматериала на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм:

$$10^{-7} \cdot (10^{\lg(S_{\lambda})^{-1}}) = \int_{\lambda_{1} t_{u}}^{\lambda_{2}} \frac{\delta_{u}(t_{u})\eta_{\lambda}\kappa_{\lambda}U\eta_{\eta}\eta_{l}}{\lambda^{4}o^{2}} \cdot \frac{2\pi c d\lambda dt_{u}}{\exp(hc/\lambda kT_{u})-1}, \quad (3.35)$$

где S_{λ} (см²/эрг) – спектральная чувствительность пленки на длине волны зеленого света для получения плотности почернения на уровне 1.

На рис.3.35-3.37 приведены расчетные графики параметров источника света, необходимые для получения плотностей почернения 1 на изопанхроматическом материале со спектральной чувствительностью аэрофотопленки «Изопанхром 17», S = 500ед. ГОСТ, при использовании объектива «Гранит» диафрагмой 4 (нижняя

кривая); 4,5; 5,6 (верхняя), при ускоряющем напряжении 9 кВ, при использовании лавсанового полупрозрачного экрана, при точечности источника 10^{-6} (рис.3.35), 5· 10^{-7} (рис.3.36), 10^{-7} (рис.3.37).

Камера с затвором с ЭОП может использоваться и в схеме с одновременной регистрацией прямого и теневого изображений в отраженном свете. Этот режим менее жесткий по требованиям к теневое изображение источнику, строится т.к. на экране с коэффициентом отражения 0,7-0,8. Однако, в условиях измерительного подобная реализуется комплекса схема с помощью фотограмметрических камер, позволяющих получать несколько изображений, достаточных для точных измерений (п. 3.3.1-3.3.3). Получение прямого изображения с помощью камеры с затвором с ЭОП целесообразно лишь в узких задачах для ответа на качественные (например, подтверждение фазы срабатывания взрывного узла испытываемого изделия; характер подлета к преграде,...), но не количественные вопросы.



Рис. 3.35 Изопанхром, 500 ед.ГОСТ, камера «ЭПОС», δ_{μ} =10⁻⁶



Рис.3.36. Изопанхром, 500 ед.ГОСТ, камера «ЭПОС», δ_{μ} =5·10⁻⁷



Рис.3.37. Изопанхром, 500 ед.ГОСТ, камера «ЭПОС», δ_{μ} =10⁻⁷

3.4.4. Силуэтное фотографирование с использованием фотосмеси.

3.4.4.1. Факторы, влияющие на качество изображений в схемах 4.1-4.3.

киносъемка быстропротекающих Силуэтная процессов фотокамерами с коммутацией изображения предназначена на МИК многокадровой регистрации ВНИИЭФ для обращенных в экспериментах, пуле-осколочных испытаниях, отработки взрывных средств метания и т.п. для определения характера взаимодействия, степени развития энерговыделения, определения состояния, формы, скорости метаемого объекта и т.д. Основными параметрами, определяющими качество получаемой фотоинформации в данной схеме, служат: частота съемки, поле зрения (размер кадра), фокусное расстояние, пропускание объектива, диафрагма, полное время регистрации.

Частота съемки выбирается в зависимости от скорости развития изучаемого процесса так, чтобы смещение изображения на пленке за время экспонирования кадра находилось в пределах разрешающей способности камеры. Опыты, в которых требуется определить характер развития взрывчатого превращения (прогрессивное – переходящее в высокоскоростную детонацию; квазистационарное –реакция всего BB в низкоскоростном режиме; либо затухающее) в испытываемом на требуют максимального полного воздействие узле, осколочное времени регистрации, т.е. минимальной частоты. Опыты, в которых требуется определить состояние (форма, вид поверхности перед соударением) разгоняемых взрывом имитаторов реальных преград (как правило, на относительно малой базе и со скоростями порядка 1 км/с), а также эксперименты, в которых испытываются изделия с заведомо возбуждаемой высокоскоростной детонацией, требуют максимальной частоты съемки. Используются камеры с коммутацией изображения типа СФР и ЖЛВ. В режиме лупы времени максимальный размер кадра b у этих камер равен 10мм (для двухрядной вставки) у СФР и 15 мм (для однорядки) у ЖЛВ. Предельная частота съемки 500000 кад/сек.

Допустимое смещение изображения на пленке $\Delta = 1/R$, где R – разрешающая способность, выражаемая здесь в лин/мм (25 (СФР), 20(ЖЛВ)). С учетом поправки на то, что плотность почернения на краю имеет зону распределения, вводится коэффициент k = (1/0,7) для величины предельного допустимого сдвига /49/ и $\Delta_{\text{доп}} = \Delta \cdot k$. Скорость смещения изображения по пленке:

$$V_{\text{cMeij}} = v \cdot b/H_{\text{max}} = v \cdot f/L, \qquad (3.36)$$

где v – характерная скорость развития регистрируемого процесса, H_{max} - максимальный размер объекта съемки, f – фокусное расстояние камеры, L – расстояние до объекта съемки.

Требуемое время экспонирования одного кадра:

 $t_{\rm экc} = \Delta_{\rm доп} / V_{\rm смещ} = L/(0,7\cdot R\cdot v\cdot f) , \qquad (3.37)$ и оптимальная частота съемки для процесса, характеризующегося скоростью v, составит v = 1/ $t_{\rm эк} = (0,7\cdot R\cdot v\cdot f)/L$. Реально, экспонирование одного кадра и период смены кадров T (время между одноименными моментами соседних кадров) не совпадают, что характеризуется скважностью камеры μ ($\mu = T/$ $t_{\rm экc}$), и требуемая частота съемки v_{\rm тр} определяется как:

 $v_{\rm rp} = (0, 7 \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{f}) / \mu \cdot \mathbf{L}. \tag{3.38}$

На практике, также, основная (полезная) информация о процессе может укладываться в 10-20 кадров (полет метаемой пластины на короткой базе разгона; разлет оболочки инициируемого изнутри взрывного узла в границах размера кадра и т.п.), так что полное время регистрации составит:

$$t_{\text{пол}} \approx H_{\text{max}} / 2v. \tag{3.39}$$

Требование по углу поля зрения камеры выражается как:

$$tg 2\alpha = H_{max} / L = b/f, \qquad (3.40)$$

где 2а - угол поля зрения камеры.

Величина H_{max} задается размером подсвечиваемого рассеивающего экрана (1,5х1,5м). Кроме того, для проведения количественных измерений в поле зрения камеры должна попадать геодезическая рейка, расположенная внизу освечиваемого экрана.

Требование к высвечиванию относительно большой зоны может приводить на больших частотах съемки к искажению изображения, если рост точечности источника меньше полного времени регистрации и имеет место большой перепад яркости по зоне экрана. В этом случае сам экран представляет собой не равномерно освечиваемый фон, а источник с меняющейся индикатрисой за время экспонирования. Поскольку при съемке любого процесса помимо серии рабочих кадров есть начальные (предварительные), требование к подсветке заключается в достижении равномерности зоны освечивания (до уровня 1,1-1,2 в отношении центра к краю) за время следования предварительных кадров. Количество предварительных кадров определяется характером регистрируемого процесса. Например, в случае пуле-осколочных испытаний, когда запуск осуществляется путем замыкания контакта летящей пулей (осколком), базовым расстоянием служит зона от контакта до объекта испытаний, определяющая, при данной частоте съемки, количество кадров до соударения пули с объектом. Если контроль скорости пули не требуется все данные кадры могут рассматриваться как предварительные; в противном случае не менее трех кадров до соударения должны быть рабочими. На практике, при малой частоте съемки это может означать, например, что рабочим должен быть уже второй кадр.

3.4.4.2. Расчет схем для получения силуэтного изображения в отраженном свете в схемах 4.1-4.3.

В силу того, что взрывной источник с использованием фотосмеси обладает цветовой температурой 2,9-2,8 кК за время, в течение которого осуществляется любой режим полной регистрации камерами типа СФР, ЖЛВ /5/, т.е. с точностью до 1,8% его температура совпадает с температурой источника типа А, с помощью которого осуществляется экспонирование фотопленок для определения их интегральной чувствительности, с точностью до 16% в качестве функции брать интегральную актиничности в данной схеме можно чувствительность пленки S_{0.85} ед.ГОСТ. При этом для любой характеристической кривой изопанхроматической пленки /46/ (при любом коэффициенте контрастности (0,6-2,4)) плотность почернения пленки будет находиться в рабочем промежутке 0,5 – 1.

Тогда общие требования, выражаемые зависимостью (3.41), сводятся к вопросам оптимального набора площади свечения, через $\delta(t)$, чтобы удовлетворить времени экспозиции $t_{3\kappa c}$ на кадр при заданной частоте съемки:

$$\kappa(t(\nu)) \cdot (0, 1 \cdot S_{0,85})^{-1} \approx \frac{1}{o^2 \Delta \lambda} \int_{\lambda} \int_{t_{rc}} F(T(t)) \kappa_{\lambda} \delta_u(t) \tau_{\lambda_3} d\lambda dt, \quad (3.41)$$

где F – светность источника (лм/м²), τ_{λ_3} – поглощение экрана на фоне которого идет регистрация, $t_{_{3KC}} \approx 1/\nu$, $\Delta\lambda$ - спектральный диапазон чувствительности пленки, $k(t(\nu))$ – коэффициент, учитывающий кривую невзаимозаместимости (изоопаку) /46/.

Требование к росту точечности подсветки (см. п.п. 3.5.4.1) можно выразить, приравняв соотношение точечностей для центра экрана и периферии (3.14) величине К = 1,2 (разница в плотности почернения на уровне 0,15 при коэффициенте контрастности 1,9):

$$K = \frac{r_u^2(t)}{r_u^2(t) + L^2} / L_{\gamma} L^2 + h_{\max}^2 \cdot \left[\frac{1}{L^2 + h_{\max}^2} - \frac{1}{L^2 + r_u^2(t) + h_{\max}^2}\right], (3.42)$$

где h_{max} - половина размера экрана.

На рис.3.38 приведены расчетные точечности источников с T=2850⁰K относительно центра экрана для получения фоновой плотности почернения на уровне 0,85 (средняя кривая), 0,5 (верхняя), 1 на изопанхроматической пленке тип «42» чувствительностью 1000ед ГОСТ при съемке камерой типа ЖЛВ с диафрагмой 19 с частотой от 20000 до 500000 кад/сек.



Рис.3.38 Расчетная точечность источника с $T{=}2850^0{\rm K}$ для силуэтной съемки на ЖЛВ

Список литературы

- 1. Волькенштейн М.В. Молекулярная оптика. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва 1951 Ленинград
- 2. Mach E. Sitzungsberichte der Wiener Akademie, 1035, 1893
- 3. Ферри А. Аэродинамика сверхзвуковых течений. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва 1953
- 4. Саламандра Г.Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. «Наука», Москва, 1974
- 5. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2002, 229с.
- 6. Лебедев А.А., Чернобровкин А.С. Динамика полета. Оборонгиз, М. 1962
- Gerasimov S.I., Kholin S.A. The Shadowgraphs Accomplishment of Supersonic Objects by means of a Radiative Shock in Gas// 19th International Symposium on Shock Waves, Marseille. July, 26-30, 1993, Volume II, p.339.
- Батьков Ю.В., Бельский В.М., Борисенок В.А., Герасимов С.И. и др. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Под редакцией Жерноклетова М.В., ВНИИЭФ, Саров, 2003, 402с., 2-издание 2005, переиздана издательством Springer в 2006г.
- Герасимов С.И., Рудько М.Л., Холин С.А. К подобию взрывных газодинамических компрессоров. ВАНТ серия: Теоретическая и прикладная физика, вып.1, 1993, с.33-35
- 10. Герасимов С.И., Холин С.А. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Взрывной кумулятивный источник излучения». Бюл. №18 27.06.95 Патент №2038528
- Герасимов С.И., Мешков Е.Е., Рудько М.Л., Хохлов В.А., Холин С.А. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Взрывной кумулятивный источник излучения». Бюл. №18 27.06.95. Патент №2038529
- 12. Герасимов С.И., Холин С.А., Е.В.Зотов. Ввод излучения фронта ударной волны в газе в световод. ВАНТ серия: Теоретическая и прикладная физика, вып.2, 1994, с.36-38
- 13. Герасимов С.И., Мешков Е.Е., Рудько М.Л., Хохлов В.А., Холин С.А. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Взрывной кумулятивный источник излучения». Бюл. №18 27.06.95. Патент №2038529

- 14. Герасимов С.И., Мищенко Н.С. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Взрывной кумулятивный источник света». Бюл.№8, 2005 Патент № 2253795
- 15. Герасимов С.И., Лень А.В., Мищенко Н.С., Вашурков А.С., Холин С.А. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Способ получения импульса света и устройство для его осуществления». Бюл. №36 27.12.2002. Патент № 2195745
- Gerasimov S.I., Meshkov E.E. Mixing light source// Proceedings of the 7th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, 3-9 July 1999, St/-Petersburg, p.469-471
- 17. Герасимов С.И., Мешков Е.Е. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Способ получения импульса света и импульсный источник света». Бюл. №19 10.07.2000. Патент №2152665
- Герасимов С.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света// В сб. Труды 7-ой Международной конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва, МЭИ, 2005
- Герасимов С.И., Лень А.В. Прямотеневое фотографирование с использованием взрывного источника света// Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук №4(49) Москва 2006 с22-27
- 20. Герасимов С.И., Холин С.А. Применение импульсного источника света. ВАНТ серия: Теоретическая и прикладная физика, вып.2-3, 2000, с.18-20
- Герасимов С.И., Холин С.А. Применение импульсного источника света для фотограмметрических измерений. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, Научно-исследовательское издание., Саров, 2002, с.498-501
- 22. Герасимов С.И., Холин С.А. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Газоразрядный источник света». Бюл. №4 10.02.2003. . Патент № 2198450
- 23. Герасимов С.И., Вашурков А.С., Лень А.В. Описание полезной модели к патенту Российской Федерации «Газоразрядный импульсный источник света». Бюл. №4 10.02.2003. Патент № 27739
- 24. Герасимов С.И., Менде Н.П., Тотышев В.К. «Система теневого фотографирования быстропротекающего процесса», патент №76166, 10.09.08 Бюл. №25
- 25. Буров М.И., Костин В.И. Аналитический фотограмметрический метод изучения кинематических параметров движения. Известия

Высших учебныз заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1979, №1, стр.83

- 26. Герасимов С.И., Лысенков В.Е., Смирнов И.Ю., Тотышев К.В. Аэробаллистический тир ВНИИЭФ.Методика проведения экспериментов, результаты испытаний// В сб. Труды 7-ой Международной конференции «Оптические методы исследования потоков», Москва, МЭИ, 2007, с.386-389
- Костин В.И. Способ фотограмметрического определения координат подвижных объектов Авторское свидетельство на изобретение № 284656 от 1.12.88г
- 28. Герасимов С.И., Костин В.И., Лысенков В. Е., Тотышев К.В. Получение, обработка и хранение информации при исследовании аэродинамических характеристик в аэробаллистическом тире ВНИИЭФ. Сборник докладов Всероссийской научно-технической школы-семинара «Передача, обработка и отображение информации при быстропротекающих процессах». Москва, РПА «АПР», 2006, с.71-77
- 29. Бердников B.A., Копытов Г.Ф., Герасимов С.И. Экспериментальное определение границы промежуточной и внешней баллистики при проведении выстрела из пороховых метательных Сборник докладов установок. 5 Научной конференции регионального Волжского центра PAPAH «Современные методы проектирования и отработки ракетноартеллерийского вооружения». В двух томах.-Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008, с.993-1001
- 30. Герасимов С.И., Позлевич В.П. Получение информации цифровыми камерами ООО «НПК Наноскан» и ЗАО «НПК Видеоскан» в опытах на многоцелевом испытательном комплексе ВНИИЭФ. Доклад на школе-семинаре «Передача, обработка и отображение информации при быстропротекающих процессах». Сочи, 02-11 октября, 2008
- 31. Герасимов С.И., Тотышев В.К. «Система оптической регистрации быстропротекающего процесса», патент №76165, 10.09.08 Бюл. №25
- 32. Герасимов С.И., Лень А.В., Файков Ю.И. Силуэтная кинорегистрация в пулеосколочных испытаниях. Источники света. Обработка изображений// Известия Российской Академии Ракетных и Артиллерийских Наук №3(48) Москва 2006 с57-59
- 33. Герасимов С.И., Лень А.В. Метод выполнения измерений по силуэтной кинорегистрации параметров движения на пулеоколочном стенде МИК ВНИИЭФ. Сборник докладов

Всероссийской научно-технической школы-семинара «Передача, обработка и отображение информации при быстропротекающих процессах». Москва, РПА «АПР», 2006, с.65-71

- 34. Герасимов С.И. Описание изобретения к патенту Российской Федерации «Система для получения изображения быстропротекающего процесса». Бюл.№4, 2007 Патент № 2293364
- 35. Weinstein L., "Large-Field Shlieren Visualization From Wind Tunnel To Flight" Proceedings of VSI-SPIE98, December 6-9, 1998, Yokohama, Japan
- 36. А.С.Кучко Аэрофотография «Недра», 1974, с.131
- 37. ГОСТ 2817-50. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод общесенситометрического испытания.
- ГОСТ 10691-63. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод общесенситометрического испытания чернобелых кинофотоматериалов общего назначения
- 39. R.W.Ditchburn Physical Optics, London, Blackie&Son Limited, 1965
- 40. Гурлев Д.С. Справочник по фотографии (светотехника и материалы), Киев, «Техніка», 1986
- 41. Михайлов В.Я. Об оценке аэроснимков, применяемых для дешифрирования. Сб. «Теория и практика дешифрирования аэроснимков», М-Л., «Наука», 1966
- 42. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации, «Мир», М., 1978
- 43. А.Л.Картужанский, П.В.Майклер ЖЭТФ, 21, 532, 1951
- 44. Мактров А.И. Влияние сдвига изображения на изобразительные свойства аэроснимков. Геодезия и картография, 1975, №5
- 45. Мактров А.И. Влияние сдвига изображения на геометрические свойства аэроснимков. Геодезия и картография, 1981, №3
- 46. Кудряшов Н.Н. Киносъемка в науке и технике. «Искусство», М., 1960
- 47. Каталог ВНИИОФИ, 2000г
- 48. Measurement and Automation Catalog. National Instruments, 2003
- 49. Крутик М.И. Многоканальные программно-управляемые электронно-оптические комплексы для скоростной регистрации серии изображений быстропротекающего процесса. Специальная техника. №1, 2002, с.36
- 50. Изнар А.Н. Электронно-оптические приборы М.: Машиностроение, 1977