

ЦВЕТНОЙ ТЕНЕВОЙ МЕТОД

© 2004 г. В. П. Трегуб

ОАО "ЛОМО", Санкт-Петербург

Рассмотрены вопросы применения цветного теневого метода для количественных измерений двумерных векторов отклонения световых лучей оптическими неоднородностями при исследовании газовых и жидкостных потоков. Проведен сравнительный анализ вариантов светлого и темного полей с квадратной и круглой формой источника излучения и ножа Фуко. Приведена иллюстрация двухкоординатной цветной теневой картины, полученной на теневом приборе ИАБ-451.

Коды OCIS: 330.0330, 200.0200, 080.0080.

Поступила в редакцию 15.04.2004.

Теневой метод визуализации отклонений световых лучей от теоретических траекторий [1–4] широко используется как при контроле aberrаций оптических деталей и систем, так и для визуализации оптических неоднородностей при исследовании газовых и жидкостных потоков [5–8]. Этот метод превосходит многие другие оптические методы контроля по ряду характеристик, в частности обладает широким динамическим диапазоном, высокой чувствительностью и высокой разрешающей способностью.

Одним из наиболее перспективных направлений развития теневого метода является цветной теневой метод [2], позволяющий получить информацию сразу о двух проекциях векторов отклонения лучей [9, 10]. Такая модификация теневого метода позволяет превратить его из качественного в количественный метод. Однако до появления цифровой техники обработки цветных изображений количественный цветной теневой метод был слишком сложен в реализации.

Настоящая статья посвящена обсуждению основных особенностей модификации двухкоординатного цветного теневого метода с применением современной цифровой техники, в том числе и с целью простой реализации этого метода на существующих теневых приборах, например ИАБ-451.

Анализ работы теневого прибора будем осуществлять в приближениях геометрической оптики [1, 2], когда, например, освещенность в некоторой точке

изображения считается пропорциональной количеству лучей, падающих в эту точку (лучевой подход).

Рассмотрим оптическую схему цветного теневого прибора (рис. 1). Лампа 1 через конденсор 2 освещает диафрагму 3, которая и является источником излучения в теневом приборе. Диафрагма 3 установлена в передней фокальной плоскости объектива задающего коллиматора 4. Между объективом 4 и объективом принимающего коллиматора 6 расположен исследуемый объект 5. В задней фокальной плоскости объектива 6 установлен нож Фуко 7, представляющий собой систему прозрачных окон в непрозрачном экране. За ножом Фуко находится проекционный объектив 8, формирующий изображение исследуемого объекта 5 на регистраторе изображения (фотоприемнике) 9. Плоскость ножа Фуко имеет вид, показанный на рис. 2.

Изображение источника излучения представляет собой равномерно освещенный белым светом квадрат с размером стороны $2c$ (на рис. 2 его контур показан штриховой линией). Нож Фуко представляет собой четыре одинаковых прямоугольных окна длиной L на непрозрачном фоне. Окна расположены по сторонам квадрата со стороной $2a$ (условно – правое, верхнее, левое и нижнее). В правом окне установлен светофильтр с номером 1 (красный). В нижнем окне установлен светофильтр с номером 3 (синий). В верхнем окне установлен составной светофильтр: одну

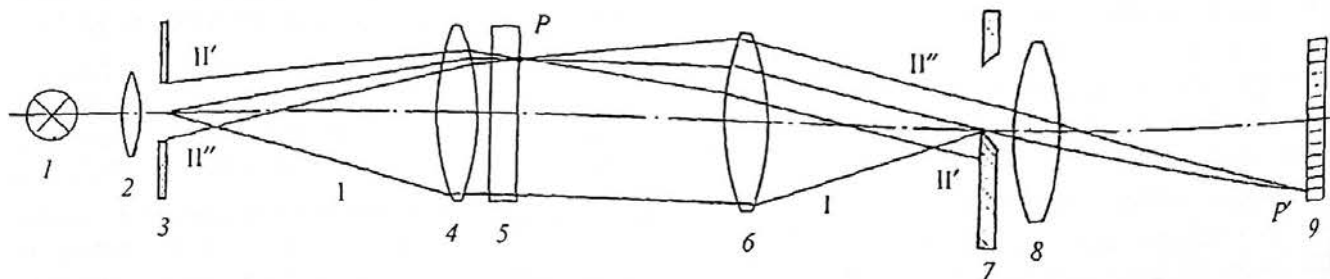


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема теневого прибора. 1 – лампа, 2 – конденсор, 3 – диафрагма, 4 – объектив задающего коллиматора, 5 – исследуемый объект, 6 – объектив принимающего коллиматора, 7 – нож Фуко, 8 – проекционный объектив, 9 – матричный фотоприемник.

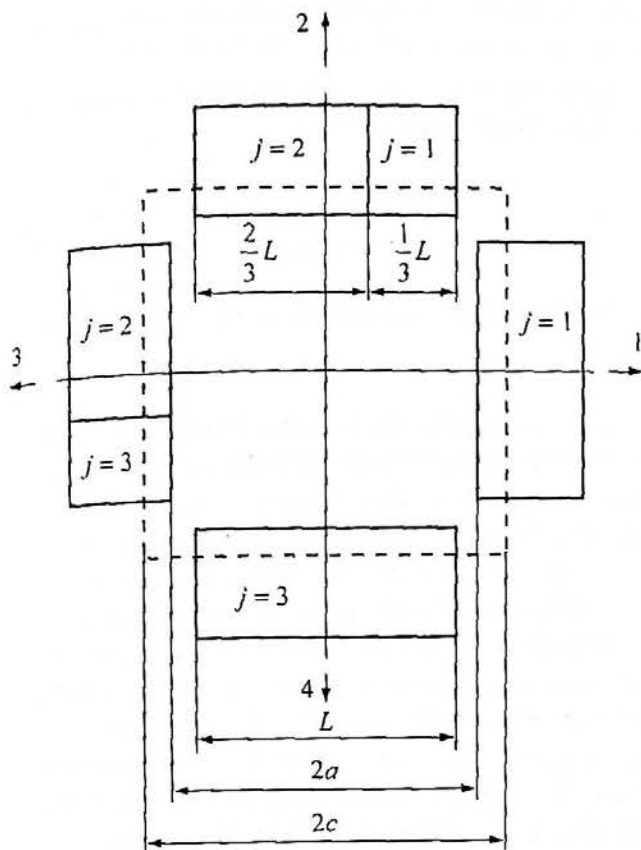


Рис. 2. Вид плоскости ножа Фуко для случая квадратной формы ножа Фуко и источника света.

треть по длине занимает светофильтр с номером 1, а оставшиеся две трети по длине занимает светофильтр с номером 2 (зеленый). В левом окне установлен также составной светофильтр: две трети по длине занимает светофильтр с номером 2, а оставшуюся одну треть по длине занимает светофильтр с номером 3. Таким образом, суммарная протяженность каждого из трех светофильтров (красного, зеленого и синего) одна и та же и равна $(4/3)L$.

Исследуемый объект 5 (рис. 1) может быть как в невозмущенном состоянии, когда все лучи от источника излучения 3 проходят через объект без изменения своих направлений, так и в возмущенном состоянии, когда лучи, проходящие через объект, претерпевают отклонения.

В невозмущенном состоянии исследуемого объекта все локальные изображения источника излучения в плоскости ножа Фуко совмещены друг с другом и образуют единое изображение, вид которого в первоначальном отъюстированном положении соответствует симметричному положению (рис. 2). В точке P' изображения объекта (см. рис. 1) сходятся лучи, вышедшие из точки P объекта и прошедшие через окна со светофильтрами ножа Фуко. В невозмущенном состоянии объекта площади засвеченных зон в каждом окне одинаковы (рис. 2), поэтому в точке P' соединяются лучи, прошедшие через три светофильтра (красный, синий и зеленый) в равных пропорциях, и соответственно изображе-

ние объекта (во всех его точках) имеет белый цвет и равномерную освещенность.

При возмущении исследуемого объекта появляются локальные оптические клинья, которые приводят к локальным смещениям изображения источника излучения в плоскости ножа Фуко на величину $g(P')$ в некотором направлении. При этом баланс цветов нарушается и изображение возмущенного объекта приобретает окраску и изменяет освещенность. Если считать, что лучи, проходящие через некую точку P возмущенного объекта, отклоняются от первоначального направления на некоторый малый угол $\omega(P)$, то локальное изображение источника излучения в плоскости ножа Фуко будет смещено от первоначального положения на величину

$$g(P') = \omega(P)f, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние объектива принимающего коллиматора 6 (рис. 1).

Задачей, решаемой с помощью цветного теневого прибора, является определение вектора $g(P')$ смещения локальных изображений источника излучения (точнее, либо двух его проекций $g_x(P')$ и $g_y(P')$, либо модуля вектора $g(P')$ и его азимутального угла α) для любой точки P' изображения исследуемого объекта.

Для решения этой задачи, прежде всего, необходимо оценить площади $S(j, P')$ пересечения локального для точки P' изображения источника излучения со светофильтром под номером j (где $j = 1, 2, 3$), меняющиеся в зависимости от величины и направления вектора $g(P')$. Для этого в качестве регистратора изображения объекта может быть использован цифровой матричный фотоприемник, например цветная CCD-матрица. Каждый элемент такой матрицы состоит из тройки элементарных селективных фотоприемников, каждый из которых имеет максимум чувствительности в соответствующем цвете, а именно: первый ($i = 1$) в красном (R – red), второй ($i = 2$) в зеленом (G – green) и третий ($i = 3$) в синем (B – blue) цвете. Исходя из лучевой модели, можно считать, что в точке P' изображения исследуемого объекта эти элементарные селективные фотоприемники вырабатывают сигналы

$$I_i(P') = \sum_{j=1}^3 a_{ij} S(j, P') \quad (i = 1, 2, 3 \text{ или } i = R, G, B), \quad (2)$$

где a_{ij} – коэффициенты, равные

$$a_{ij} = a_0 \int_0^\infty B(\lambda) \tau(\lambda) \tau_j(\lambda) \eta_i(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

a_0 – некоторая константа, λ – длина волны используемого излучения, $B(\lambda)$ – спектральная яркость источника излучения, $\tau(\lambda)$ – спектральное распределение коэффициента пропускания оптической системы теневого прибора, $\tau_j(\lambda)$ – спектральное распределение

коэффициента пропускания светофильтра с номером j , расположенного в ноже Фуко; $\eta_j(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоприемника с номером i .

Следует отметить, что исследуемый объект мы считаем неселективным, т. е. имеющим одинаковый коэффициент пропускания во всем используемом спектральном диапазоне, и оказывающим влияние на величину сигналов $I_i(P')$ только через величины площадей $S(j, P')$.

Выражение (2) представляет собой систему из трех уравнений с тремя неизвестными (для того чтобы число неизвестных было равно числу уравнений, были использованы составные из трех цветов (R, G, B) светофильтры, в отличие от ранее известных вариантов с четырьмя и более светофильтрами). Если функции $\tau_j(\lambda)$ имеют небольшую ширину и ярко выраженную селективность, то определитель матрицы коэффициентов $\{a_{ij}\}$ будет заведомо отличен от нуля, и решение системы (2) имеет вид

$$S(j, P') = \sum_{i=1}^3 (a^{-1})_{ij} I_i(P'), \quad (4)$$

где $(a^{-1})_{ij}$ — элементы матрицы, обратной матрице $\{a_{ij}\}$.

Обсудим теперь вопрос о порядке величин, измеряемых с помощью теневого метода. Теневые приборы используются для решения задач контроля как малых деформаций оптического волнового фронта, составляющих доли длины волны света, так и больших деформаций волнового фронта, составляющих десятки длин волн. Первая задача, в основном, характерна для контроля оптических деталей и систем, а вторая, например, для исследований газовых либо жидкостных потоков.

Подход к решению этих задач несколько различен. Для решения первой (прецизионной) задачи используют узкие (щелевые) источники излучения, и реакция теневого прибора на смещение изображения источника отличается резко выраженной нелинейностью и большой крутизной на определенном малом участке. Для решения второй (с большим диапазоном отклонений) задачи используют протяженный источник излучения, и реакция теневого прибора на отклонение лучей отличается широким диапазоном и линейностью. В рамках представлений геометрической оптики (без учета дифракционных явлений) вполне допустимо рассмотрение только второй (с широким диапазоном отклонений) задачи.

При решении задачи с широким диапазоном отклонений можно считать, что эксперимент можно построить таким образом, чтобы величины локального смещения изображения источника излучения в плоскости ножа Фуко были ограничены некоторой предельной величиной $g_{\max}$. При этом целесообразно рассмотреть два варианта цветного теневого

метода, которые можно назвать светлопольным и темнопольным.

Светлопольный вариант (вариант 1) характеризуется условием (рис. 2)

$$\left. \begin{aligned} c &> a, \\ c - a &> g_{\max}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а темнопольный вариант (вариант 2) — условием

$$c = a \gg g_{\max}. \quad (6)$$

В обоих вариантах при смещении изображения источника излучения на величину $g_{\max}$ его наружный контур не должен доходить до внешних границ окон со светофильтрами в плоскости ножа Фуко, т. е. окна должны быть достаточно широкими.

Теперь необходимо решить задачу перехода от площадей $S(j, P')$ к проекциям вектора смещения изображения источника $g_x(P')$ и $g_y(P')$. Отметим предварительно, что дальнейшее рассмотрение проведем для конкретной точки изображения исследуемого объекта P' . Учитывая это, для упрощения записей будем обозначать вектор $g(P')$ через g , площади $S(j, P')$ через S_j , другие величины — аналогично.

Светлопольный вариант (вариант 1)

Для варианта 1 при невозмущенном состоянии исследуемого объекта площади пересечения изображения источника излучения с каждым из светофильтров (R, G, B) в плоскости ножа Фуко равны между собой:

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_0 = \frac{4L(c-a)}{3}. \quad (7)$$

Значения проекций вектора g смещения изображения источника можно найти из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} g_x &= \frac{3}{8L}(3S_1 + S_3 - 4S_0) = \frac{1}{8L}(5S_1 - S_3 - 4S_2), \\ g_y &= -\frac{3}{8L}(S_1 + 3S_3 - 4S_0) = \frac{1}{8L}(S_1 - 5S_3 + 4S_2). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В светлопольном варианте 1 суммарная площадь зон пересечения изображения источника излучения с окнами со светофильтрами в плоскости ножа Фуко является постоянной величиной независимо от величины и направления смещения изображения источника излучения при возмущении исследуемого объекта:

$$(1/3) \sum_{j=1}^3 S_j = S_0. \quad (9)$$

Это условие можно использовать для косвенной оценки влияния шумов на результаты измерений.

Темнопольный вариант (вариант 2)

Рассмотрим теперь темнопольный вариант 2 построения теневого прибора, когда размеры изображения источника излучения $2c$ равны расстоянию между кромками ножа $2a$ (рис. 2), а не превышают его, как в светлопольном варианте. Тогда в невозмущенном состоянии исследуемого объекта его изображение будет темным, а при возмущении объекта в его изображении будет появляться свет, причем тем большей интенсивности, чем больше величина вектора g смещения изображения источника в плоскости ножа Фуко.

Для определения векторов смещения лучей g , вернее их проекций на оси координат g_x и g_y , по полученным значениям S_1, S_2, S_3 , разобьем координатное пространство вектора g на пять зон (I, II.1, II.2, III, IV), как показано на рис. 3.

При вычислении проекций вектора поперечных смещений g_x и g_y по величинам S_1, S_2, S_3 , полученным в результате измерений сигналов фотоприемников, мы сначала упорядочим величины S_j по убыванию. Затем мы отбросим минимальный член, поскольку шумы при измерении сигналов на него влияют наиболее сильно и, кроме того, он может вообще не нести информации о проекциях g_x и g_y . Итак, для вычислений мы используем средний и максимальный по величине члены.

Рассмотрим отдельно каждую зону.

Зона I. Условие принадлежности вектора g этой зоне имеет вид

$$\min(S_1, S_2, S_3) = S_3, 2S_1 > S_2. \quad (10)$$

Для этой зоны можно написать

$$\left. \begin{aligned} g_x &= \frac{1}{L} \left(S_1 - \frac{1}{2} S_2 \right), \\ g_y &= 3S_2 / 2L. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

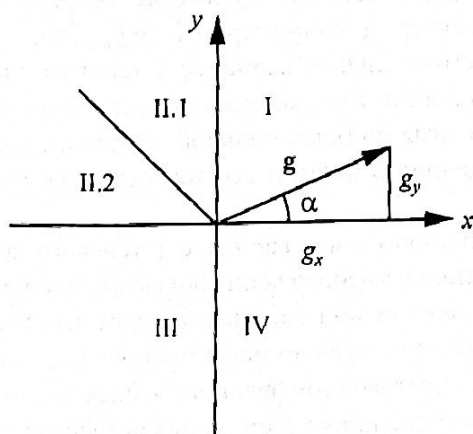


Рис. 3. Разбиение на зоны координатного пространства вектора g (пояснения в тексте).

Зона II.1. Условие принадлежности вектора g этой зоне имеет вид

$$\min(S_1, S_2, S_3) = S_3, 2S_1 < S_2. \quad (12)$$

Для этой зоны можно написать

$$\left. \begin{aligned} g_x &= \frac{3}{L} \left(S_1 - \frac{1}{2} S_2 \right), \\ g_y &= 3S_1 / L. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Зона II.2. Условие принадлежности вектора g этой зоне имеет вид

$$\min(S_1, S_2, S_3) = S_1, 2S_3 < S_2. \quad (14)$$

Для этой зоны можно написать

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -3S_3 / L, \\ g_y &= -\frac{3}{L} \left(S_3 - \frac{1}{2} S_2 \right). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Зона III. Условие принадлежности вектора g этой зоне имеет вид

$$\min(S_1, S_2, S_3) = S_1, 2S_3 > S_2. \quad (16)$$

Для этой зоны можно написать

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -3S_2 / 2L, \\ g_y &= -\frac{1}{L} \left(S_3 - \frac{1}{2} S_2 \right). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Зона IV. Условие принадлежности вектора g этой зоне имеет вид

$$\min(S_1, S_2, S_3) = S_2. \quad (18)$$

Для этой зоны можно написать

$$\left. \begin{aligned} g_x &= S_1 / L, \\ g_y &= -S_3 / L. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Таким образом, нами описан алгоритм перехода от площадей S_1, S_2, S_3 к проекциям вектора смещения изображения источника излучения для цветного теневого метода с квадратной формой источника излучения и ножа Фуко. Отметим, что описанный алгоритм обработки сигналов фотоприемника является достаточно простым и легко реализуемым при цифровой обработке видеоинформации.

Квадратная форма источника излучения и ножа Фуко не является единственно возможной при реализации цветного теневого метода. С точки зрения простоты реализации наиболее удобной является круглая форма источника излучения и ножа Фуко.

Рассмотрим варианты с круглыми источником и ножом Фуко (рис. 4).

Светлопольный вариант (вариант 3)

Показанное на рис. 4 взаимное положение изображения источника излучения и ножа Фуко соответствует случаю невозмущенного объекта. Изображение источника излучения представляет собой равномерно освещенный белым светом круглый диск радиуса r_c (на рис. 4 его контур показан штриховой линией). Нож Фуко представляет собой круглый непрозрачный диск радиуса r_a на прозрачном фоне. Наружный контур окна имеет круглую форму радиуса r_b . Радиусы r_a , r_b и r_c выбраны таким образом, чтобы выполнялись условия

$$\left. \begin{aligned} r_c &> r_a, \\ r_c - r_a &> g_{\max}, \\ r_b - r_c &> g_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Прозрачное кольцевое окно с внутренним радиусом r_a и наружным радиусом r_b разбито на три равных сектора, в которых установлены соответствующие светофильтры основных цветов ($j = R, G, B$) или ($j = 1, 2, 3$).

Площади зон пересечения изображения источника с соответствующими светофильтрами в плоскости ножа Фуко обозначим, как и в предыдущих вариантах, через S_j ($j = 1, 2, 3$). В невозмущенном состоянии исследуемого объекта (рис. 3) все S_j равны между собой

$$S_1 = S_2 = S_3 = S_0 = \frac{1}{3}\pi(r_c^2 - r_a^2). \quad (21)$$

При возмущении исследуемого объекта площади S_j изменяются, но при этом выполняется условие (9), которое так же, как и в варианте 1, можно исполь-

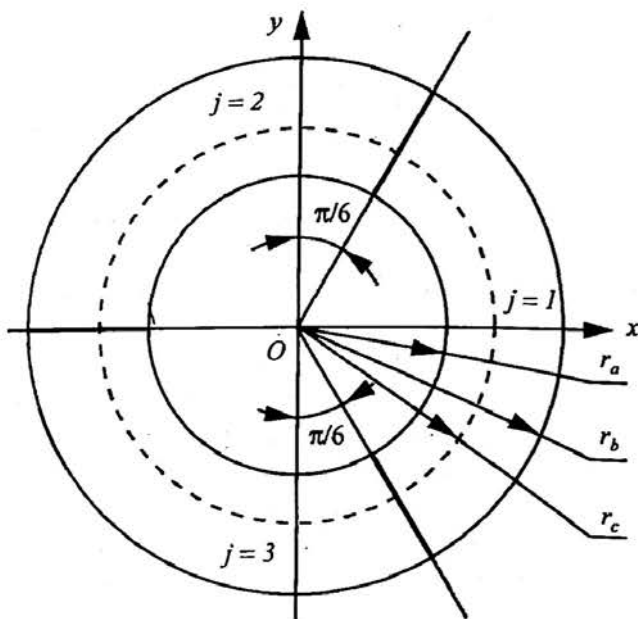


Рис. 4. Вид плоскости ножа Фуко для случая круглой формы ножа Фуко и источника света.

зовать для косвенной оценки влияния шумов на результаты измерений.

Темнопольный вариант (вариант 4)

Вариант 4 отличается от варианта 3 только другими относительными размерами изображения источника излучения и ножа Фуко при сохранении их круглой формы. Точнее, это частный случай варианта 3 при условии

$$\left. \begin{aligned} r_c &= r_a = r, \\ r &\gg g_{\max}, \\ r_b - r &> g_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Таким образом, вариант 4 является темнопольной модификацией варианта 3 так же, как и вариант 2 является темнопольной модификацией варианта 1.

Рассмотрим теперь, как меняется теневая картина при визуальном наблюдении исследуемого объекта, если изменяются параметры вектора g смещения лучей в плоскости ножа Фуко, т. е. его модуль (длина) g и аргумент (азимутальный угол) α .

В темнопольном варианте 2 при изменении α в диапазоне от $-\pi/2$ до 0 цветовой тон изображения объекта [11] будет насыщенным (насыщенность равна 1), меняющимся от синего к красному через фиолетовый. При увеличении α от 0 до $3\pi/4$ цветовой тон изображения будет меняться от красного до зеленого через желтый, а насыщенность цвета будет уменьшаться от 1 при $\alpha = 0$ до 1/2 при $\alpha = 3\pi/4$. При дальнейшем увеличении угла α от $3\pi/4$ до $3\pi/2$ цветовой тон изображения будет изменяться от зеленого до синего, а насыщенность цвета будет возрастать от 1/2 при $\alpha = 3\pi/4$ до 1 при $\alpha = 3\pi/2$ (соответствует $\alpha = -\pi/2$).

В светлопольном варианте 1 при изменении угла α цветовой тон изображения будет изменяться фактически так же, как и в темнопольном варианте.

Если при постоянном угле α меняется длина (модуль) вектора g , например от 0 до $g_{\max}$, то:

в темнопольном варианте 2 теневого прибора освещенность изображения объекта будет возрастать от нуля до максимальной величины, при этом насыщенность цвета и его тон остаются постоянными;

в светлопольном варианте 1 теневого прибора освещенность изображения объекта будет оставаться постоянной, при этом насыщенность цвета будет изменяться от нуля до максимальной (меньше единицы), а цветовой тон будет оставаться постоянным.

При смещениях изображения источника излучения, близких к максимальным ($g \rightarrow g_{\max}$), изображения исследуемого объекта в темнопольном и свет-

дополном варианте становятся похожими друг на друга. Однако в светлорольном варианте освещенность изображения объекта будет больше, чем в темнорольном, за счет большего изображения источника излучения, при этом насыщенность цвета в светлорольном варианте остается меньше единицы при любом значении азимутального угла α .

В варианте 3, как и в варианте 1, для невозмущенного объекта цвет фона теневой картины является белым. При наличии вектора смещения изображения источника g относительно ножа Фуко теневое изображение приобретает окраску, причем цвет теневой картины определяется азимутальным углом α , а насыщенность цвета будет тем больше, чем больше величина модуля g . Визуально теневые картины в вариантах 1 и 3 похожи.

Для невозмущенного объекта в варианте 4 фон теневого изображения будет темным аналогично варианту 2, а при появлении возмущений исследуемого объекта в теневом изображении будет появляться свет. При этом цвет в некоторой точке теневой картины будет определяться азимутальным углом α вектора g и будет соответствовать комбинации цветов светофильтров, установленных в кольцевом окне ножа Фуко.

Например, в частных случаях: при $\alpha = 0$ цвет будет $j = 1$ ($j = R$), при $\alpha = 2\pi/3$ цвет будет $j = 2$ ($j = G$), при $\alpha = -2\pi/3$ цвет будет $j = 3$ ($j = B$).

Сравнительный анализ вышеизложенных четырех вариантов цветного теневого прибора показывает следующее.

С точки зрения визуальной оценки наблюдаемых явлений темнорольные варианты 2 и 4 теневого прибора представляются более предпочтительными, чем светлорольные, поскольку темнорольные варианты дают более контрастное и легко распознаваемое теневое изображение. При использовании компьютерной обработки видеoinформации это обстоятельство не играет существенной роли. При этом в светлорольных вариантах 1 и 3 имеется возможность контроля точности измерений путем расчета суммы всех частичных площадей, которая должна быть равна заданной константе (см. условие (9) для вариантов 1 и 3), что является достоинством этих вариантов.

С точки зрения линейности зависимости площадей S_j от g , некоторое предпочтение имеют варианты 1 и 2 (квадратный нож) перед вариантами 3 и 4 (круглый нож). Однако ввиду возможности учета этой нелинейности при математической обработке результатов измерений и наличия неизбежных отклонений параметров схемы теневого прибора от номинала (например, неравномерности яркости по площади источника излучения) этот фактор (нелинейности S_j от g), скорее всего, не окажет существен-

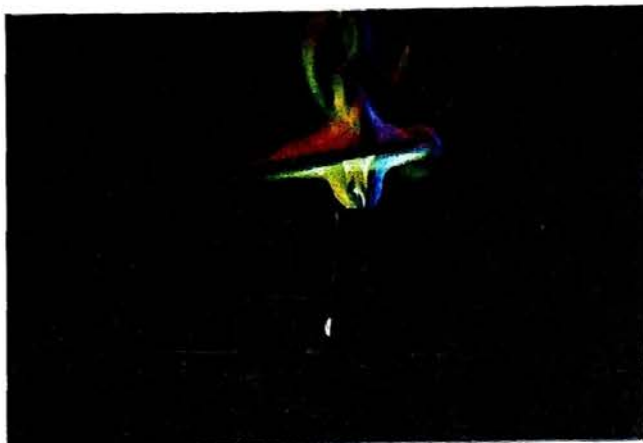


Рис. 5. Цветная теневая картина воздушных потоков вблизи пламени свечи.

ного влияния на результаты обработки. Отметим также, что круглая форма источника и ножа Фуко (варианты 3 и 4) более технологична и проста в исполнении, чем квадратная.

Для примера на рис. 5 приведена цветная теневая картина воздушных потоков у пламени свечи с экраном из металлической сетки сверху (вариант 4 — темное поле с круглым ножом Фуко, теневой прибор ИАБ-451).

Таким образом, цветной двухкоординатный теневой метод, основанный на использовании ножа Фуко с окнами со светофильтрами RGB, возможен и прост в осуществлении и при этом существенно улучшает теневую картину. Картина становится более наглядной, более информативной (т. е. выявляющей новые свойства объекта) и согласованной с характеристиками цветного матричного фотоприемника, что в свою очередь обеспечивает возможность превращения теневого метода из качественного в количественный. Полезно отметить, что изложенные в данной работе варианты цветного теневого метода достаточно легко реализуемы на существующих теневых приборах в конкретных условиях исследовательских лабораторий без подключения профессионального оптико-механического производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максудов Д.Д. Теневые методы исследования оптических систем // Проблемы новейшей физики. В. XXIII. Л.—М.: ГТТИ, 1934. 172 с.
2. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
3. Philbert M. // Optica Acta. 1967. V. 14. № 2. P. 169–181.
4. Оптический производственный контроль / Под ред. Малакары Д. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
5. Холдер Д., Норт Р. Теневые методы в аэродинамике. М.: Мир, 1966. 176 с.

6. Васильев Л.А., Отменников В.Н. Исследование высокоскоростных газовых потоков тепловым фотометрическим методом при использовании визуализирующих диафрагм сложных форм // ОМП. 1976. № 8. С. 3-6.
7. Брамсон М.А., Красовский Э.И., Наумов Б.В. Морская рефрактометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 246 с.
8. Яковлев В.А. Многоцелевой комплекс для оптико-физических исследований в аэродинамических трубах // Измерительная техника. 1994. № 9. С. 49-53.
9. Сеттлз Г.С. Ракетная техника и космонавтика. 1970. Т. 8. № 12. С. 208.
10. Безменова Т.Н., Брухман В.Я., Дмитриева В.Б., Попков В.А., Яковлев В.А. Осветительное устройство к тепловому прибору ИАБ-451 для реализации четырехцветного цветного метода // ОМП. 1982. № 8. С. 59-60.
11. Волосов Д.С., Цивкин М.В. Теория и расчет светооптических систем проекционных приборов. М.: Искусство, 1960. 526 с.