

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ  
ОПТИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 144(204)

1973

1885/20

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
метрологии им. Д. И. Менделеева

---

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 144 (204)

Под редакцией

канд. техн. наук А. И. Карташева



1973

ж  
18851  
ж

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова (секретарь), В. С. Горбачевич, А. Н. Гордов, Е. Ф. Долгинский, Л. К. Каяк, И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Е. Д. Колтик, П. П. Кремлевский, И. Н. Кротков, В. Л. Лассан, Б. Н. Олейник, Л. К. Пеккер, Т. Б. Рождественская, А. М. Федоров, Е. Н. Чечурина, К. П. Широков, М. Ф. Юдин

*Ответственный редактор  
доктор технических наук профессор  
В. О. АРУТЮНОВ*



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник посвящен различным вопросам, связанным с современными методами контроля характеристик оптических систем, а также интерференционными методам измерения различных физических величин, поляризационным измерениям, рефрактометрии, фотометрии и колориметрии.

В статье С. А. Родионова рассматриваются вопросы нормализации характеристик оптических систем. Оптическая система рассматривается как одно из звеньев в общей цепи передачи информации физическим прибором.

В статьях И. Ш. Эцина и В. А. Москалева, Н. М. Нагибной, Н. А. Полушкиной и Л. П. Приятелова приведены принципы повышения точности интерференционных измерений. В первой предлагается модуляционный метод измерения малых разностей фаз, а во второй — применение интерферометра последовательного типа для измерительных целей.

Применение фазового контраста с целью повышения разрешающей способности проекционных систем изложено в статье А. И. Карташева и К. С. Ошаниной.

Вопросам чувствительности фотоэлектрических поляриметров посвящена статья Е. А. Волковой и И. С. Сорокиной. В статьях Б. А. Желудова и Н. В. Ивановой разобраны вопросы рефрактометрии и измерения двойного лучепреломления.

В статьях В. Д. Дмитриева и Г. К. Холопова, Б. М. Дрейфуса, В. Е. Карташевской, Н. В. Пивоваровой, К. А. Дудиной, Н. С. Москалевой, Г. М. Сахарова рассмотрены спектрофотометрические методы измерения: определение спектральной чувствительности фотоэлементов, допустимые размеры щелей призм

ных монохроматоров и методы градуировки спектрофотометров среднего класса точности.

Статьи Е. Н. Юстовой и И. Н. Паиновой, Н. М. Никитиной, К. А. Алексеевой посвящены колориметрии. В частности, в них представлены данные измерения порога цветоразличения в разных направлениях от белого цвета, новые таблицы для испытания цветного зрения.

*Редактор*

## О НОРМАЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

За последние годы в оптическом приборостроении значительно возросли требования к качеству изображения оптических систем, которые теперь в большинстве случаев используются в сложном комплексе переработки информации, включающем приемники изображения, растры, модуляторы, электронные блоки и т. д. Получила развитие теория изображения, рассматривающая современные понятия и характеристики, описывающие работу оптической системы как одного из звеньев такого комплекса. Применение ЦВМ при проектировании оптических систем позволяет оценить качество изображения системы чисто расчетным путем и делает возможным автоматическую оптимизацию оптических систем с целью получения заданных характеристик.

Однако внедрению прогрессивных методов проектирования и оценки качества изображения оптических систем мешает отсутствие нормализации основных характеристик оптических приборов, отработанных методов (программ, руководств) для их расчета и приборов для их измерения. В связи с этим конструкторы в большинстве случаев недостаточно уверенно ориентируются в современных понятиях качества изображения (например таких, как оптические передаточные функции) не всегда правильно представляют их смысл и связь с традиционными характеристиками и критериями (разрешающей способностью, остаточными aberrациями), и поэтому избегают применять их при разработке технических требований к оптической системе и в процессе ее проектирования и испытания.

К основным вопросам, нормализация которых в настоящее время становится совершенно необходимой, следует отнести: перечень и определение основных параметров и характеристик оптических систем; критерии качества изображения; методы расчета и измерения параметров, характеристик и критериев; перечень необходимой измерительной аппаратуры и требования к ней.

В настоящей работе рассматриваются некоторые принципиальные вопросы, связанные с нормализацией характеристик оптических систем, а также предлагается один из вариантов нормализации.

Для облегчения ориентации в множестве характеристик и выявления смысла каждой из них необходима прежде всего их классификация. Если рассматривать оптическую систему как одно из звеньев в цепи передачи информации, то для описания ее работы в такой цепи можно отвлечься от принципа действия системы и физической сущности построения изображения. Для этой цели необходимы такие характеристики, которые были бы общими для всех звеньев цепи и удобными для сквозного расчета через всю цепь. Именно эти характеристики, которые можно назвать внешними, должны регламентироваться техническим заданием на разработку системы. Вообще говоря, знания этих характеристик достаточно потребителю, «заказчику» системы для того, чтобы определить, как будет работать данная система в его комплексе и решить вопрос о ее пригодности.

Однако при проектировании оптической системы одних внешних характеристик недостаточно. Для того чтобы наиболее рациональным образом разработать систему, отвечающую заданным требованиям, конструктор должен принимать во внимание физические принципы работы системы. Характеристики, описывающие физику образования оптического изображения, назовем внутренними характеристиками.

Любая оптическая система имеет более или менее протяженное поле зрения, причем в общем случае характеристики, описывающие качество изображения какого-либо участка предмета, зависят от положения его в поле зрения. При рассмотрении работы системы обычно все поле зрения разбивают на ряд так называемых изопланатических зон, в пределах которых характеристики можно считать постоянными.

Характеристики, которые рассматриваются в пределах какой-либо одной зоны, будем называть зональными, а те, которые рассматриваются в пределах всего поля зрения, — глобальными.

Рассмотрим, какие характеристики можно использовать в качестве внешних. Цепь передачи информации обычно состоит из многих последовательных звеньев, например таких, как атмосфера, объектив, фотографическая эмульсия, электронно-оптический преобразователь, модулятор, электронно-лучевая трубка и т. д. В качестве звеньев в цепь могут включаться и отдельные процессы, влияющие на качество изображения, такие, как вибрация и сдвиг. Каждое звено воспринимает входную информацию — предмет и преобразует ее в выходную — изображение. Предмет и изображение представляют собой распределения каких-либо физических величин на поверхности предмета и изображения соответственно и могут быть описаны функциями

$I(y, z)$  и  $I'(y', z')$  от обобщенных координат  $y, z$  и  $y', z'$  на этих поверхностях.

Необходимо подчеркнуть, что поверхности предметов и изображений, так же как и конкретное содержание функций предмета и изображения, определяют предыдущим и последующим звеньями цепи. Так, если последующим звеном является фотопластинка, то поверхностью изображения будет плоскость вблизи системы, а функцией изображения — освещенность. Если последующее звено глаз наблюдателя, то поверхность изображений есть бесконечно удаленная сфера, а функция изображения представляет собой яркость.

Внешние характеристики должны полностью описывать работу данного звена в цепи и могут быть, в свою очередь, разбиты на три группы — передаточные, присоединительные и габаритные.

Передаточные характеристики показывают влияние звена на передаваемую информацию. Система передаточных характеристик должна полностью моделировать работу звена так, чтобы, зная передаточные характеристики, можно было бы вычислить функцию изображения любого предмета. Как известно, все передаточные характеристики содержатся в так называемой функции рассеяния точки (ФРТ)  $h(y, z, y', z')$ , описывающей изображение точечного объекта единичной энергии, расположенного в точке  $y, z$  на поверхности предметов. Изображение  $I'(y', z')$  произвольного предмета  $I(y, z)$  выражается через ФРТ интегральным оператором

$$I'(y', z') = \iint I(y, z) h(y, z, y', z') dy dz.$$

Однако ФРТ не вполне удобна для практического использования. Для наглядности целесообразно разделить передаточные характеристики, содержащиеся ФРТ, с тем, чтобы каждая описывала передачу отдельных свойств предмета. Для этого будем рассматривать передачу изображения в два последовательных этапа. Предположим, что на первом этапе оптическая система является стигматической, т. е. изображает точку предмета также в виде точки. Структура предмета таким образом передается без изменений, а меняются лишь его размеры и форма, а также энергия. Рассмотрим изображение малого участка предмета, имеющего размеры  $\Delta y, \Delta z$  и расположенного в центре какой-либо зоны, — в точке с координатами  $y_0, z_0$ . В дальнейшем для простоты ограничимся случаем центрированных систем, для которых достаточно одной координаты  $y_0$ , называемой величиной предмета.

Указанный участок предмета имеет энергию  $\epsilon$ , равную интегралу от функции обобщенной интенсивности по обобщенным координатам

$$\epsilon = \iint_{\Delta y \Delta z} I(y, z) dy dz.$$



Изображение этого участка будет иметь размеры  $\Delta y^1, \Delta z^1$  и энергию  $e' = \iint_{\Delta y^1 \Delta z^1} I'(y', z') dy' dz'$ . Характеристиками, описывающими передачу размеров и формы предмета, будут масштабные передаточные характеристики — меридиональное  $v_y$  и сагитальное  $v_z$ , обобщенные зональные увеличения

$$v_y = \frac{\Delta y'}{\Delta y}; \quad v_z = \frac{\Delta z'}{\Delta z}.$$

Передачу энергии можно описать энергетической передаточной характеристикой — обобщенной светосилой  $H = e'/e$ .

Чтобы ввести характеристики, показывающие передачу тонкой структуры предмета, — структурные передаточные характеристики, рассмотрим второй этап образования изображения, на котором производится переход от стигматического изображения (для данного этапа являющегося предметом) к окончательному. На этом этапе меняется только тонкая структура изображения; размеры, форма и энергия остаются без изменений.

Для описания передачи только тонкой структуры может использоваться нормированная функция рассеяния  $h(y' - y, z' - z)$ , которая, в отличие от рассмотренной ранее, имеет единичную энергию и выражается в координатах предмета и изображения, приведенных на поверхность изображений при помощи масштабных преобразований.

Более удобным, однако, является описание передачи тонкой структуры в терминах пространственных частот, так как последние непосредственно количественно выражают «степень тонкости» структуры. В области пространственных частот передача структуры описывается оптической передаточной функцией (ОПФ)  $D(v, \theta)$ , которая есть преобразование Фурье нормированной функции рассеяния. ОПФ (в общем случае комплексная функция) может быть представлена двумя вещественными функциями — своим модулем или частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ)  $T(v, \theta)$  и своим аргументом или частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ)  $\varphi(v, \theta)$ . Эти характеристики имеют простую физическую интерпретацию, которая может быть принята в качестве их метрологического определения, а именно: ЧКХ показывает передачу контраста, а ЧФХ — передачу начального сдвига в изображении элементарного гармонического объекта, имеющего пространственную частоту  $v$  и ориентацию под углом  $\theta$  к оси  $y$ .

Итак, имеем три группы зональных передаточных характеристик: масштабные, энергетические и частотные. Нетрудно убедиться в том, что рассмотренная система характеристик описывает полностью прохождение изображения через данное звено. Кроме того, эти характеристики универсальны, так как не затрагивают устройства данного звена и одинаково применимы к любому звену (фотоматериалу, ЭОП, сдвигу). Наконец, такая сис-



тема характеристик удобна для практического использования, поскольку результирующие характеристики цепи находятся как произведение характеристик отдельных звеньев, и наглядна, поскольку характеристика описывает передачу отдельного свойства объекта.

В общем случае зональные характеристики зависят от положения зоны, т. е. от величины предмета  $y_0$ . Эту зависимость можно описать при помощи глобальных передаточных характеристик. Наиболее просто это осуществляется для масштабных и энергетических характеристик. Выделяя осевую или параксиальную зону, для которой величина предмета равна нулю, выразим увеличение и светосилу через функции, связывающие их с осевыми характеристиками, а именно: через функцию относительной дисторсии и функцию светораспределения. Нетрудно получить следующие выражения, связывающие зональные характеристики с глобальными:

$$v_y = v_0 \left[ 1 + \Delta(y_0) + \frac{\partial \Delta(y_0)}{\partial y_0} y_0 \right] \frac{k_y}{k'_y};$$

$$v_z = v_0 [1 + \Delta(y_0)] \frac{k_z}{k'_z};$$

$$H = H_0 \Phi(y_0),$$

где  $k_y, k'_y, k_z, k'_z$  — коэффициенты, зависящие от выбора глобальных и зональных координат;  $V_0$  — параксиальное увеличение;  $H_0$  — центральная светосила;  $\Delta(y_0)$  — функция относительной дисторсии;  $\Phi(y_0)$  — функция светораспределения.

Рассмотрим присоединительные характеристики, необходимые для согласования данного звена с предыдущим и последующим звеньями. Они могут быть разделены на три группы — предметные, зрачковые и спектральные.

Предметные присоединительные характеристики описывают положение и размеры поверхностей предмета и изображения. К ним относятся обобщенные передний и задний отрезки — величины, определяющие расстояние до предмета и изображения, а также размеры поля зрения и изображения.

Зрачковые характеристики определяют положение, размеры и форму входного и выходного зрачков. Так как указанные параметры, вообще говоря, зависят от величины предмета, эти характеристики необходимо разделить на зональные и глобальные. Для централизованных систем форма зрачка для любой точки предмета может быть аппроксимирована эллипсом, для определения размеров и формы которого достаточно двух полуосей — меридиональной и зональной обобщенных апертур  $A_y, A_z$  ( $A'_y, A'_z$  — для выходного зрачка). Положение зрачка можно определить величинами  $S_p$  и  $S'_p$  — обобщенными передним и задним положениями зрачка, входного и выходного. Эти параметры

составляют зональные зрачковые присоединительные характеристики.

Выделяя центральную зону, получим глобальные зрачковые присоединительные характеристики. Для этой зоны в силу осевой симметрии  $A_y = A_z$ ;  $A'_y = A'_z$ . Обозначим характеристики этой зоны — обобщенные переднюю и заднюю центральные апертуры и обобщенное параксиальное положение входного и выходного зрачков буквами  $A_0$ ,  $A'_0$ ,  $S_{p0}$ ,  $S'_{p0}$ . Характеристики других зон выразим при помощи функций обобщенного виньетирования  $F_y(y_0)$ ,  $F_z(y_0)$ ,  $F'_y(y_0)$ ,  $F'_z(y_0)$  и функций аббераций положения зрачков  $\Delta S_p(y_0)$ ,  $\Delta S'_p(y_0)$ :

$$A_y = A_0 F_y(y_0); \quad A_z = A_0 F_z(y_0); \quad A'_y = A'_0 F'_y(y_0); \\ A'_z = A'_0 F'_z(y_0); \quad S_p = S_{p0} + \Delta S_p(y_0); \quad S'_p = S'_{p0} + \Delta S'_p(y_0).$$

Спектральные присоединительные характеристики описывают диапазон длин волн света, в котором работает данное звено. Они состоят из основной длины волны  $\lambda_0$  — середины этого диапазона, полуширины диапазона  $\Delta\lambda$  и функции  $g\lambda$  относительной спектральной эффективности, включающей в себя в виде произведения спектральную чувствительность приемника, спектральное пропускание звена и спектральную интенсивность объекта.

Рассмотренные выше характеристики можно было назвать обобщенными, так как функции предмета и изображения, к которым относятся эти характеристики, выражались в обобщенных координатах. Это было сделано для получения большей универсальности характеристик. Применительно к конкретным приборам необходимо конкретизировать эти обобщенные понятия тем или иным способом, выбор которого зависит от рассматриваемого случая.

При анализе оптических систем обычно рассматривают два случая положения предмета и соответственно изображения: если предмет находится настолько далеко, что пучки лучей, исходящих из его точек, можно считать параллельными, то его называют бесконечно удаленным. В противном случае предмет считается расположенным на конечном расстоянии. При таком определении теряется симметрия между этими случаями. Так например, в первом случае расстояние до предмета принимает только одно (и притом неудобное) значение «бесконечности», а во втором случае оно может принимать любые, отличные от «бесконечности» значения.

Для внесения симметрии введем другие определения «бесконечности» и «конечного расстояния», основанные не на величине расстояния до предмета, а на восприятии размеров предмета. Будем считать, что предмет находится на «конечном» расстоянии, если его поперечные размеры воспринимаются как линейные и на «бесконечности», если они рассматриваются как угловые. Продольные отрезки, например, передний (для случая конеч-

ного расстояния до предмета) также воспринимаются как линейные. Для случая «бесконечности» продольные отрезки, связанные с предметом, удобнее всего выражаются в диоптриях. Таким образом, с понятием «бесконечности» связывается определенная мера.

Для величин, связанных со зрачками, наблюдается обратная картина. В случае конечного расстояния до предмета входной зрачок может находиться на бесконечном удалении (телецентрический ход), поэтому будем считать зрачок бесконечно удаленным и его поперечные размеры (апертуры) рассматривать как угловые величины, а продольные отрезки (положение зрачка) измерять в диоптриях и определять как величину, обратную расстоянию от предмета до зрачка.

Для случая «бесконечно удаленного» предмета зрачок всегда находится вблизи системы, поэтому его поперечные размеры — апертуры — определяются как линейные величины. Положение зрачка измеряется также в единицах длины относительно первой поверхности системы.

Благодаря полной симметрии между понятиями «бесконечно» и «конечного» расстояний до предмета оказывается возможным сохранить инвариантность всех основных соотношений между характеристиками, независимо от того, какой случай рассматривается.

К пространству изображений применимы совершенно аналогичные рассуждения.

Рассмотрим внутренние характеристики, отражающие физические принципы работы системы. Это принципы достаточно полно могут быть описаны в рамках линейной теории электромагнитного поля, причем в большинстве случаев достаточно скалярного приближения. Воздействие оптической системы на электромагнитное поле, исходящее из какой-либо точки предмета, характеризуется функцией комплексного пропускания  $f(Y, Z)$ , показывающей изменение комплексной амплитуды при прохождении через систему от поверхности входного зрачка до выходного:

$$f(Y, Z) = \tau^{1/2}(Y, Z) \exp [2\pi i W(Y, z)],$$

где  $Y, Z$  — обобщенные координаты на зрачке;  $\tau(Y, Z)$  — коэффициент пропускания;  $W(Y, Z)$  — волновая aberrация.

Функция  $f(Y, Z)$ , называемая также зрачковой функцией, отлична от нуля только в пределах эллиптических областей  $\Omega$  и  $\Omega'$  на зрачках; размеры этих областей определяются апертурами  $A_y, A_z$  и  $A_{y'}, A_{z'}$ , которые, следовательно, неявным образом также содержатся в зрачковой функции. Указанные параметры зрачковой функции, как можно показать, полностью описывают работу системы в пределах данной зоны и длины волны, т. е. являются зональными монохроматическими внутренними характеристиками.

Рассмотренные ранее передаточные характеристики легко могут быть найдены, если известна зрачковая функция и условия работы системы. В частности, для некогерентного освещения справедливы следующие соотношения:

$$v_y = \frac{A_y}{A_y}; \quad v_z = \frac{A_z}{A_z}; \quad H = \pi \tau A_y A_z;$$

$$D(v, \theta) = \frac{1}{H} \iint f(Y + v\lambda \cos \theta, Z + v\lambda \sin \theta) f^*(Y, Z) dY dZ.$$

Коэффициент пропускания  $\tau$  в большинстве случаев может считаться постоянным; функция волновой aberrации  $W(Y, Z)$  удобнее всего представляется коэффициентами разложения в ряд по степеням координат  $\rho (\beta^2 + \gamma^2)^{1/2}$ ,  $\cos \varphi = \beta/\rho$ ;

$$W(Y, Z) = W(\rho, \cos \varphi) = \sum_{i,j} w_{ij} \rho^i \cos^j \varphi, \quad i+j \text{ четное}, \quad i > j,$$

где

$$\beta = \frac{Y}{A_y}; \quad \gamma = \frac{Z}{A_z}.$$

В некоторых случаях волновая aberrация может быть выражена через поперечные aberrации, пропорциональные ее частным производным по координатам  $Y, Z$ .

Хроматизм системы, выражающийся зависимостью волновой aberrации от длины волны, может быть представлен хроматическими разностями коэффициентов  $w_{ij}$ , т. е. коэффициентами волнового хроматизма.

Глобальные свойства системы могут быть описаны при помощи совокупности указанных характеристик для различных точек предмета.

Итак, с точки зрения конструктора свойства системы полностью и достаточно наглядно описываются внутренними характеристиками: коэффициентом пропускания, апертурами, коэффициентами волновой aberrации и волнового хроматизма (либо поперечными aberrациями) для нужного количества точек предмета.

В заключение необходимо остановиться на проблеме измерения характеристик оптических систем. Нормализация характеристик, рассмотренная в данной статье, возможна только при обеспечении измерительными средствами. Отсутствие серийно выпускаемых аттестованных приборов, снабженных методиками измерения всех основных характеристик, приводит к грубому нарушению принципов метрологии. Таким образом, первоочередной задачей является создание комплекса измерительных приборов, который должен включать:

— универсальную оптическую скамью для измерения фокусных расстояний, увеличений, отрезков, aberrаций оптических сис-

тем с высокой точностью, с фотоэлектрической установкой и отсчетом перемещений;

— оптическую скамью для измерения ОПФ любых оптических систем с погрешностью 0,01—0,02;

— интерферометр для измерения волновых aberrаций и монохроматических ОПФ (как интерферометр сдвига);

— приборы для измерения коэффициентов пропускания оптических систем;

— приборы для измерения ЧКХ фотоматериалов ЭОП и т. п.

Поступила в редакцию

20/IX 1971 г.



**МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ  
ИЗМЕНЕНИЙ РАЗНОСТИ ФАЗ  
В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

При визуальном способе наблюдения с помощью интерферометров, широко применяемых для измерения различных физических величин, удается обнаружить изменения разности фаз на  $0,1-0,2$  рад. В то же время некоторые микрофазометрические методы радиофизики [1, 2] позволяют получить более высокую чувствительность порядка  $10^{-7}-10^{-8}$  рад. Применение фотоприемника и модуляции выходного потока излучения дает возможность использовать для измерения разности фаз известные радиофизические методы и получить чувствительность такого же порядка в интерферометрии.

Метод интерференционных измерений, обладающий такими возможностями, получил название «модуляционного» [3]. Он заключается в том, что в небольших пределах осуществляют изменение разности фаз (разности хода) интерферирующих колебаний по периодическому закону и тем самым изменяют модуляцию интенсивности в интерференционной картине. При помощи фотоприемника регистрируют освещенность в небольшой области поля интерференции и измеряют амплитуды и фазы нулевой, первой и в некоторых случаях второй гармоник электрического сигнала фотоприемника, по величине которых судят о разности фаз.

Теория модуляционного метода разработана лишь для случая измерений малых периодических изменений разности фаз в двухлучевых интерферометрах [2, 3, 4]. Цель настоящей работы — разработать теорию модуляционного метода для часто встречающихся на практике случаев измерения однократных и непериодических медленных изменений разности фаз.

Общая схема рассматриваемой измерительной установки изображена на рис. 1. Источник света 1 изображается конденсором 2 в плоскости диафрагмы 3, находящейся в фокусе объектива 4 коллиматора. Пучок света после прохождения интерферо-



метра 5 собирается с помощью выходного объектива 6 на фотоприемнике 7. Зеркала интерферометра 5 настраивают каким образом, чтобы в фокусе объектива 6 образовалась картина колец равного наклона. Из-за ограничения светового пучка диафрагмой 3 диаметр светового пучка на фотоприемнике составляет долю диаметра первого кольца. Как показано в работе [5], использование центрального участка картины колец равного наклона дает значительный выигрыш в светосиле, а при многолуче-

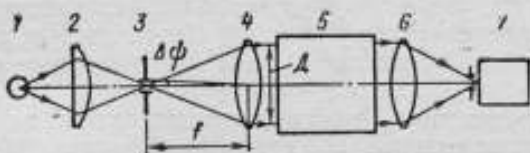


Рис. 1.

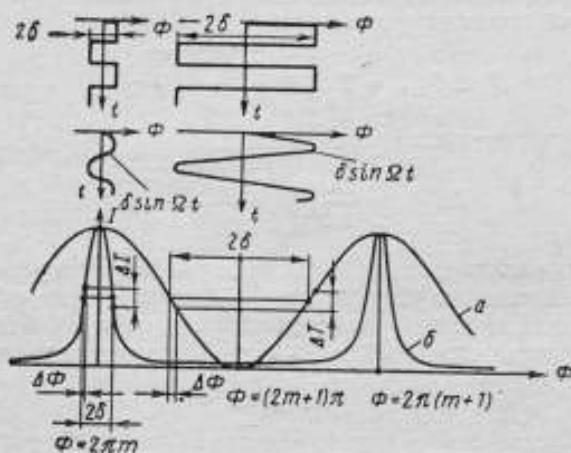


Рис. 2.

вой интерференции и в резкости полос по сравнению с использованием полос равной толщины.

Рассмотрим два наиболее употребительных способа модуляции разности фаз  $\Phi$ : прямоугольная и синусоидальная в двух случаях типичных распределений интенсивности  $I$  в интерференционной картине — синусоидального, характерного для двухлучевой, и Эри, характерного для многолучевой интерференции. Функции распределения интенсивности представлены на рис. 2; в верхней части рисунка показана форма модуляции разности фаз.

При прямоугольной модуляции электрический сигнал фотоприемника представляет собой прямоугольные периодические импульсы; при изменении разности фаз величина сигнала меняется,

но форма его остается неизменной. При синусоидальной модуляции форма сигнала непрерывно меняется при изменении разности фаз; наиболее простую форму сигнал имеет в двух крайних случаях — в точках экстремума функции распределения (рис. 2), когда он содержит только четные гармоники (так называемый случай наблюдения двойной частоты), и в точках перегиба, где при малых амплитудах модуляции форма сигнала повторяет форму модуляции. Как показано в работе [6], при обоих способах модуляции, несмотря на существенную разницу в форме сигнала, величины амплитуд первой гармоники при изменении  $\Delta\Phi$  разности фаз от положений максимума или минимума почти идентичны.

При разностях хода, много меньших длины когерентности излучения, минимальное обнаруживаемое изменение разности фаз (наличие предела обнаружения обусловлено дробовым шумом фотоприемника) определяется выражениями [6]:  
для двухлучевого интерферометра

$$\Delta\Phi_{\min} = 2\pi \sqrt{\frac{(1+B)e\Delta f}{16i_0}}; \quad (1a)$$

для многолучевого интерферометра

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{2\pi}{1,3} \sqrt{\frac{(1+B)e\Delta f}{Fi_0}}; \quad (16)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\Delta f$  — ширина полосы пропускания электронно-усилительного устройства;  $B$  — коэффициент, обусловленный вторичной эмиссией электронов, для фотомножителей может быть принят равным 1,5;  $F$  — коэффициент резкости;

$$i_0 = e\theta \frac{P}{h\nu} \quad (2)$$

— среднее значение фототока;  $\theta$  — квантовый выход фотоприемника;  $P$  — средний поток излучения, попадающий на фотоприемник;  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота света.

Согласно известному соотношению фотометрии поток (см. рис. 1)

$$P = TB_s \Delta\Omega s = TB_s \frac{\pi D^2}{4f^2} \pi \Delta\psi^2 f^2 = T \frac{\pi^2}{4} B_s D^2 \Delta\psi^2, \quad (3)$$

где  $T$  — пропускание интерферометра, для упрощения примем  $T=1$ ;  $B_s$  — энергетическая яркость источника света;  $\Delta\Omega$  — телесный угол светового пучка, попадающего в объектив;  $s$  — используемая площадь источника света;  $2\Delta\psi$  — угол расхождения используемого светового пучка внутри интерферометра;  $D$  — диаметр светового пучка внутри интерферометра.

Вследствие конечности размеров источника уменьшается видимость интерференционной картины, и регистрируемая разность фаз сдвигается в сторону меньших значений  $\Phi$ . Это вызвано тем,

что конечный размер диафрагмы (в случае круглого отверстия), ограничивающей используемый размер источника света, связан с угловым расхождением  $2\Delta\psi$  пучка света в интерферометре, соответствующим интервалу разностей фаз

$$e = \frac{\Delta\psi^2 \Phi}{2}. \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая разностей хода, много меньших длины когерентности, предпочтительно применение круглых диафрагм, соответствующих  $e = \pi/N_{\text{эфф}}$ , когда уменьшение видимости не превышает 5% [7]. Подставляя это значение в уравнение (4), получаем

$$\Delta\psi^2 = \frac{2\pi}{N_{\text{эфф}} \Phi}. \quad (5)$$

Для двухлучевой интерференции можно принять в формуле (5)  $N_{\text{эфф}} = 2$ .

Подставив выражения (5) в (3), (3) в (2) и (2) в (1), будем иметь:

для двухлучевого интерферометра,

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{2\pi}{D} \sqrt{\frac{\hbar \nu \Phi (1+B) \Delta f}{4\pi^2 B_3 \theta}}, \quad (6a)$$

для многолучевого интерферометра

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{2\pi}{D} \sqrt{\frac{\hbar \nu \Phi (1+B) \Delta f}{10 B_3 N_{\text{эфф}} \theta}}, \quad (6b)$$

где  $N_{\text{эфф}}$  — эффективное число интерферирующих пучков.

При достаточно малых разностях хода угловые размеры источника света в реальных схемах интерферометров настолько малы по сравнению с величиной, выражаемой формулой (5), что необходимость в дополнительном ограничении (диафрагмировании) пучка отпадает.

В этом случае  $\Delta\Phi_{\min}$  в некоторых пределах не зависит от  $\Phi$  и может быть вычислена по формуле (1).

В модуляционных интерферометрах с лазерами дробовой шум не является фактором, ограничивающим чувствительность измерений. Ограничение чувствительности создают шумовые флуктуации лучистого потока лазера, обусловленные спонтанным излучением возбужденных атомов активной среды, преобладающих фотонный шум светового излучения. При использовании лазера  $\Delta\Phi_{\min}$  в широких пределах разностей фаз не зависит от  $\Phi$  и определяется только тремя параметрами — коэффициентом хаотической модуляции потока излучения, шириной полосы пропускания усилителя и коэффициентом резкости интерференционных полос.

В таблице представлены результаты расчета  $\Delta\Phi_{\min}$  по формулам (1) и (6) при  $\theta = 0,07$ ,  $\Delta f = 1$  Гц для различных спектральных линий, интерферометров, разностей хода и способов модуля-



Линия излучения	Тип интерферометра	Разность фаз $\Phi$	Разность хода $\Delta$	Модуляция	Минимальное обнаружимое изменение разности фаз	Сечение зеркала, соответствующее $\Delta\Phi$ мин. ам
Зеленая Hg	Майкельсона	$< \pi \cdot 10^3$	0,3 мм	Прямоугольная	$\frac{2\pi}{6,3 \cdot 10^3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Зеленая Hg	»	$< \pi \cdot 10^3$	0,3 мм	Синусоидальная	$\frac{2\pi}{5,9 \cdot 10^3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Зеленая Hg	Фабри—Перо	$< \pi \cdot 10^3$	0,03 мм	Прямоугольная	$\frac{2\pi}{5 \cdot 10^3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Зеленая Hg	»	$< \pi \cdot 10^2$	0,03 мм	Синусоидальная	$\frac{2\pi}{4,6 \cdot 10^3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
Оранжевая $^{80}\text{Kr}$	Майкельсона	$4\pi \cdot 10^3$	1,2 мм	Прямоугольная, синусоидальная	$\frac{2\pi}{5 \cdot 10^4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Оранжевая $^{80}\text{Kr}$	»	$2\pi \cdot 10^5$	60 мм	То же	$\frac{2\pi}{3,6 \cdot 10^3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
Зеленая Hg	»	$2\pi \cdot 10^3$	0,6 мм	»	$\frac{2\pi}{2 \cdot 10^3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Зеленая Hg	Фабри—Перо	$2\pi \cdot 10^3$	0,5 мм	»	$\frac{2\pi}{3,5 \cdot 10^3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
Красная He—Ne лазер	Майкельсона	$0-4\pi \cdot 10^7$	0—12 м	»	$\frac{2\pi}{2,5 \cdot 10^3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Красная He—Ne лазер	Фабри—Перо	$0-4\pi \cdot 10^6$	0—1,2 м	»	$\frac{2\pi}{2 \cdot 10^4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$

ции. Для красной линии гелий — неоновом лазера использовали данные работы [8].

Как видно, чувствительность модуляционных интерферометров очень высока. Наиболее просто можно реализовать предельные возможности модуляционного метода при измерениях малых механических перемещений. Хотя чувствительность двухлучевых интерферометров достаточно высока ( $4 \cdot 10^{-4}$  нм), для получения необходимых результатов, даже в самых тонких физических экспериментах, предпочтительно использование интерферометра Фабри-Перо. Для достижения высокой механической и температурной стабильности, необходимых при измерениях весьма малых смещений, конструкция интерферометра Фабри-Перо более удобна.

Использование одночастотного газового лазера дает большой выигрыш в чувствительности при больших  $\Phi$ ; при малых  $\Phi$  применение лазера нецелесообразно, так как оно не приводит к существенному повышению чувствительности, но связано с технически трудно выполнимой стабилизацией выходного потока излучения. Согласно расчетам автора,  $\Delta\Phi_{\min} = \frac{2\pi}{2 \cdot 10^6}$  при разности фаз в интерферометре Фабри-Перо  $\Phi = 4\pi \cdot 10^6$ . Может сложиться впечатление, что в этом случае создаются условия для получения средней квадратической относительной погрешности  $2,5 \cdot 10^{-12}$ . Однако при практических измерениях какой-либо величины, например длины или показателя преломления, в погрешность результата измерений входит погрешность значения длины волны. В связи с тем, что длина волны линии излучения лазера не может быть определена с погрешностью, меньшей погрешности табличного значения первичной эталонной длины световой волны  $^{86}\text{Kr}$  ( $10^{-8}$ ), измеряемая величина не может быть определена с погрешностью, меньшей  $10^{-8}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берштейн И. Л. О флуктуациях в ламповом генераторе. ДАН СССР, т. 68, 1949.
2. Горелик Г. С. Некоторые микрофазометрические методы в радиофизике и оптике. «Измерительная техника», 1955, № 3.
3. Горелик Г. С. О применении модуляционного метода в оптической интерферометрии. ДАН СССР, т. 83, 1952.
4. Берштейн И. Л. Об измерении весьма малых измерений разности хода двух световых колебаний. ДАН СССР, т. 94, 1954.
5. Tolansky S. and Bradley D. J. Symposium Interferometry. Nat. Phys. Lab., London, 1959.
6. Эцин И. Ш. Модуляционный метод измерения весьма малых смещений разности фаз в интерференционных схемах. «Измерительная техника», 1968, № 5.
7. Joffe J. H. JOSA, № 43, p. 1171, 1953.
8. Зайцев Ю. И. О флуктуациях излучения газового лазера. ЖЭТФ, т. 50, вып. 3, 1966.

Поступила в редакцию  
20/IX 1971 г.



В. А. МОСКАЛЕВ, И. М. НАГБИНА  
Н. А. ПОЛУШКИНА Л. П. ПРИЯТЕЛОВА  
ЛИТМО

УДК 535.853.4

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

В последнее время в советской и зарубежной литературе стали уделять большое внимание интерферометрам последовательного типа (ИПТ).

Для интерферометров последовательного типа характерно последовательное линейное расположение элементов. В зависимости от того, каким образом элементы интерферометра расположены относительно оптической оси, ИПТ можно разделить на две группы. К первой группе относятся многозеркальные многолучевые ИПТ, зеркала которых ориентированы перпендикулярно оптической оси и соответственно параллельно друг другу. Многолучевой характер интерференционной картины определяет основные особенности этих схем.

Ко второй группе относятся ИПТ с наклонными зеркалами. Зеркала в этих интерферометрах ориентированы под некоторым углом (как правило малым) к оптической оси, причем геометрические продолжения этих зеркал в начальном положении интерферометра пересекаются в одной точке (полюсе интерферометра). Некоторые свойства таких ИПТ аналогичны свойствам обычных зеркальных интерферометров. Основные же особенности ИПТ с наклонными зеркалами обусловлены последовательным расположением элементов и сводятся к возможности использования схем с кратными ветвями, к необходимости определенным образом выбирать коэффициенты отражения зеркал и т. д.

Многолучевые многозеркальные ИПТ по мультиплексной схеме неоднократно в разных вариантах применялись для исследования сверхтонкой структуры спектральных линий, а также в качестве сложного интерференционного фильтра для выделения монохроматического излучения [1, 2, 3].

Впервые ИПТ с тремя наклонными зеркалами был осуществлен В. А. Савиным, как дальнейшее развитие идеи академика



А. А. Лебедева [4]. В. А. Савиным [5] были отмечены ряд особенностей и положительных свойств такой схемы, в частности, возможность использования кратных ветвей в целях повышения чувствительности измерений. Позднее более детально особенности и свойства трехзеркального ИПТ рассматривались в работе [6].

В настоящей работе рассматриваются ИПТ с точки зрения возможности их применения для измерительных целей. Принципиальная схема ИПТ с наклонными зеркалами представлена на

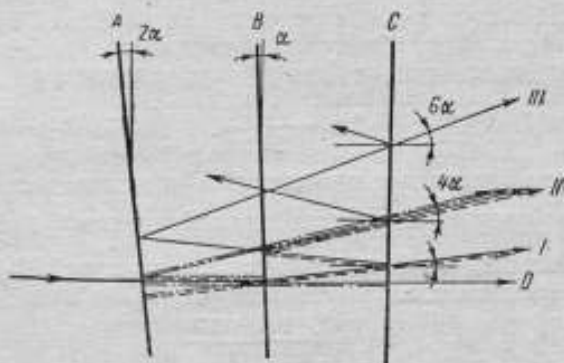


Рис. 1. Принципиальная схема интерферометра последовательного типа.

рис. 1 Зеркала  $A$ ,  $B$  и  $C$ , располагаясь последовательно, образуют две ветви  $A - B$  и  $B - C$ . Падающий луч, войдя в систему зеркал  $A$ ,  $B$  и  $C$ , в результате многократных отражений выйдет из нее в виде отдельных групп лучей  $O$ ,  $I$ ,  $II$ , ..., которые образуют углы, кратные  $2\alpha$  к направлению распространения падающего луча. Число лучей в  $I$  группе — 2, в  $II$  группе — 4, в  $III$  группе — 6 и т. д. Каждая из групп образует свою интерференционную картину, характерную для того количества лучей, которое в ней присутствует. Пространственное разделение групп позволяет выделить группу наибольшей интенсивности, отвечающую двухлучевой интерференции. При начальном параллельном расположении зеркал группы лучей пространственно не разделяются, и поэтому происходит сложение интенсивностей всех групп лучей, что приводит к образованию интерференционной картины многолучевого типа [7, 8]. ИПТ может работать при равных и кратных расстояниях между зеркалами  $A - B$  и  $B - C$  как в двухлучевом, так и в многолучевом вариантах.

С использованием многолучевого ИПТ при кратных разностях хода ( $p=2, 3, 4...$ ) значительно повысилась точность и чувствительность измерений, в особенности при исследовании протяженных объектов. Это объясняется тем, что в описываемых

схемах ИПТ, в отличие от эталона Фабри-Перо, интерференционная картина соответствует малым разностям хода, так как даже при внесении протяженного объекта в одну из ветвей, появляющаяся дополнительная оптическая длина пути может быть компенсирована перемещением одной из пластин вдоль оптической оси системы (см. рис. 1).

Известно, что одним из путей повышения точности измерения является применение многолучевой интерференции. Это позволяет более точно фиксировать изменения малых долей порядка интерференции. Поэтому переход от двухлучевой к многолучевой системе ИПТ в этом смысле целесообразен. Для общего случая можно написать связь между изменением показателя преломления объекта  $\Delta n$ , имеющего длину  $l$ , и изменением фазы  $\Delta\varphi$ , т. е.

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2l} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (1)$$

Изменение фазы ведет к изменению интенсивности  $\Delta I$  в рассматриваемой точке интерференционной полосы. Градиент  $\frac{dI}{d\varphi}$  будет тем больше, чем большее число пучков лучей  $N_{\text{эфф}}$  участвует в интерференции, т. е.

$$\Delta\varphi = \frac{1}{N_{\text{эфф}}} \frac{\Delta I}{I_{\text{max}}} \quad (2)$$

или

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2l N_{\text{эфф}}} \frac{\Delta I}{I_{\text{max}}} \quad (3)$$

При прочих равных условиях в ИПТ величина  $l$  может быть в несколько раз больше, чем, например, в простом интерферометре Фабри — Перо. Число же эффективных интерферирующих лучей в многолучевом варианте ИПТ при оптимальных условиях достигает величины  $N_{\text{эфф}} = 10$ . Таким образом, меньшее число  $N_{\text{эфф}}$  по сравнению с эталоном Фабри — Перо компенсируется возможностью использования больших длин объекта  $l$ , что дает определенный выигрыш в чувствительности. Очевидно ИПТ позволит увеличить точность и чувствительность измерений путем использования ветвей с кратным отношением их длин за счет многократного прохождения лучей через объект.

Недостатком интерферометра является малое пропускание. Однако работа при небольших разностях хода дает возможность использовать источники излучения невысокой монохроматичности, но достаточной яркости. Это имеет большое значение при использовании многолучевого варианта, так как обычно при больших расстояниях между пластинами эталона Фабри — Перо для наблюдения хорошей картины требуется источник весьма высокой монохроматичности.

Заметим, что ИПТ отличаются простотой оптической схемы. Это дает возможность сделать ИПТ компактным и мало чувст-

вительным к вибрациям и температурным влияниям внешней среды.

Преимущество последовательного расположения отдельных ветвей ИПТ состоит еще и в том, что отсутствует влияние изменений, происходящих в одной ветви, на другую ветвь. Это особенно важно, когда исследованию подвергаются объекты, находящиеся при высоких температурах. Линейное расположение ветвей дает возможность использовать поляризационные элементы в схеме прибора, что позволяет проводить одновременно поляризационные и интерференционные измерения.

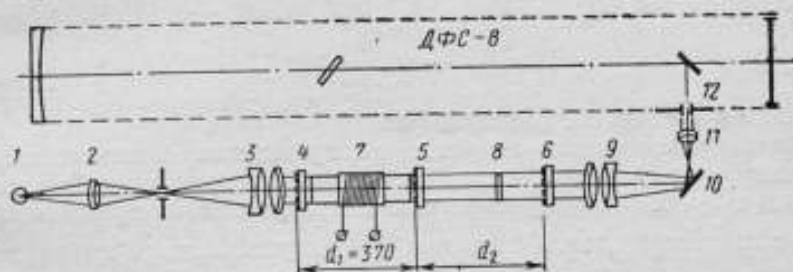


Рис. 2. Схема установки для исследования аномальной дисперсии.

1 — лампа ДКСИ-1000; 2 — конденсор; 3, 9 — объективы; 4, 5, 6 — интерференционные зеркала; 7 — трубка с парами натрия; 8 — компенсационная пластинка; 10 — вращательное зеркало; 11 — проектирующая линза; 12 — входная щель спектрографа ДФС-8.

Экспериментальные результаты показали целесообразность применения ИПТ для измерения аномальной дисперсии методом «крюков» Д. С. Рождественского [9], измерения напряженного состояния прозрачных моделей и для изучения температурных полей.

При исследовании аномальной дисперсии методом «крюков» Д. С. Рождественского была проверена возможность увеличения чувствительности и точности измерений при использовании многолучевого ИПТ с кратными длинами ветвей [10]. Схема установки, на которой проводились измерения, дана на рис. 2. Увеличение точности и чувствительности метода крюков связано с тем, что расстояние вершины крюка от линии поглощения при перестройке интерферометра на кратность ветвей, равную  $p$ , возрастает в  $\sqrt{p}$  раз. Это объясняется увеличением эффективной длины пути лучей, проходящих через исследуемый объект. Применение ИПТ с кратными ветвями увеличивает чувствительность измерений в  $2p$  раз по сравнению с интерферометром Рождественского; при этом точность возрастает в  $\sqrt{2p}$  раз. Можно работать при кратности ветвей  $p=4$ , что ведет к увеличению чувствительности измерений в 8 раз.

Методика исследования температурных полей основана на том, что при изменении температуры газа меняется его плот-

ность, а следовательно, и показатель преломления. Последнее можно оценить по смещению интерференционных полос.

При решении плоских задач, т. е. равномерном распределении температуры вдоль луча просвечивания, важно как можно точнее определить  $\Delta k$ -долю в изменении порядка интерференции. Подобная ситуация возникает также при исследовании малых неоднородностей прозрачных оптических материалов.

Как известно, погрешность  $\sigma$  измерения оптической толщины  $nl$  определяется относительной полушириной интерференционной полосы и наименьшим регистрируемым смещением полосы  $\gamma$

$$\sigma = \gamma \frac{\Delta\varphi}{2\pi}, \quad (4)$$

где  $\Delta\varphi$  — изменение разности фаз.

Здесь существенным является распределение освещенности в интерференционной картине, зависящее от вида интерференционных полос (двухлучевая или многолучевая интерференция), так как минимальная величина  $\frac{\Delta\varphi}{2\pi}$  определяется эффективным

числом интерферирующих пучков  $N_{\text{эфф}}$ . Поэтому точность в определении  $nl$  может быть оценена следующим образом: для  $N_{\text{эфф}}=2$  и  $\gamma=0,1$  полосы  $\sigma=0,025\lambda$ , а для  $N_{\text{эфф}}=10$   $\sigma=0,005\lambda$ .

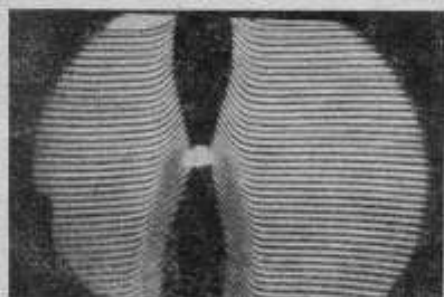


Рис. 3. Интерференционная картина дугового разряда.

Исследование температурных полей дугового разряда было проведено при использовании двухлучевого варианта интерферометра. На рис. 3 представлена интерференционная картина, полученная на установке для исследования дугового разряда, возникающего между железными электродами. Сочетание спектроскопического и интерферометрического методов дает возможность построить кривые распределения температуры по радиусу дуги [11].

Как известно, интерферометрические исследования на моделях, изготовленных из оптически нечувствительного материала, проводимые в дополнение к методам фотоупругости на моделях из оптически чувствительного материала, позволяют весьма просто определить главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в любой точке модели [12, 13]. Но так как исследования проводятся на различных моделях, то неизбежно возникают дополнительные погрешности при определении напряжений. В двухлучевом ИПТ

при интерференционных измерениях рабочим является пучок света, претерпевший минимальное число отражений; пучок света, прошедший без отражений, не используется (см. рис. 1).

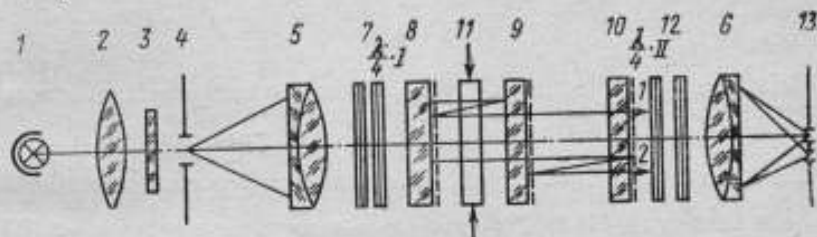


Рис. 4. Принципиальная схема интерференционно-поляризационной установки.

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — входная диафрагма; 4 — объективы коллиматора и камеры; 5, 6 — светофильтр; 7 — поляризатор; 8, 9, 10 — интерференционные зеркала; 11 — исследуемая модель; 12 — анализатор; 13 — выходная диафрагма;  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$  — четвертьволновые и полуволновые пластинки.

Если поместить блок интерференционных пластин в поле кругового поляризатора, то в пучке света, прошедшем без отражений, могут быть осуществлены поляризационные исследования [14, 15].

Таким образом, в приборе одновременно могут работать два канала: интерференционный и поляризационный. На рис. 4 показана оптическая схема интерференционно-поляризационной установки (ИПУ). Полное исследование плоско-напряженного состояния производится в этой схеме с использованием одной модели, изготовленной из оптически чувствительного материала. При этом в одном из каналов установки — интерференционном — может быть получена совмещенная картина разности напряжений (изохром) и суммы напряжений (изопах). На рис. 5 показана совмещенная интерференционно-поляризационная картина.

Работа на ИПУ значительно сокращает время на обработку экспериментальных данных, полученных с помощью поляриза-

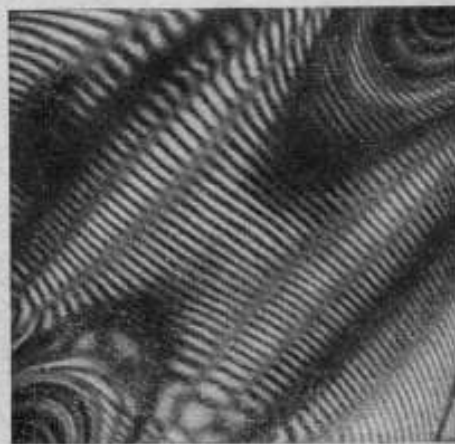


Рис. 5. Совмещенная картина изохром в изопах.



ционнно-оптического метода. Установка ИПУ может быть использована для решения задач динамики при изучении напряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батарчукова Н. Р. Оптический метод получения строго монохроматического излучения. ДАН СССР, т. 58, 1947, № 6.
2. Королев Ф. А. Спектроскопия высокой разрешающей силы. ГИТТЛ, 1953.
3. Толанский С. Спектроскопия высокой разрешающей силы. Изд-во иностр. лит., 1958.
4. Романова М. Ф. Интерференция света и ее применение. ОНТИ, 1937.
5. Савин В. А. Интерферометр для измерения углов клиньев. «Оптико-механическая промышленность», 1937, № 6.
6. Post D. Characteristics of the Series Interferometer. «J. Opt. Soc. Amer.», 1954, v. 44, № 3.
7. Москалев В. А., Нагибина И. М., Полушкина Н. А. Многолучевые интерференционные полосы наложения в интерферометре последовательного типа. «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 12.
8. Москалев В. А., Полушкина Н. А. Некоторые характеристики многолучевого интерферометра последовательного типа. Изв. вузов. «Приборостроение», т. XIII, 1970, № 12.
9. Рождественский Д. С. Работы по аномальной дисперсии в парах металлов. Изд. АН СССР, 1951.
10. Нагибина И. М., Полушкина Н. А. Повышение чувствительности метода «крюков» с помощью применения интерферометра последовательного типа. «Оптика и спектроскопия», т. XXVI, вып. 3, 1969.
11. Нагибина И. М., Приятелева Л. П. Исследование температурного поля разряда комбинированным спектроскопическим и интерференционным методами. Труды комиссии по спектроскопии АН СССР, вып. I, 1963 (XIII Всесоюзное совещание по спектроскопии).
12. Москалев В. А., Хесин Г. Л., Нагибина И. М. Интерферометр для изучения поля напряжений в прозрачных моделях. Изв. вузов. «Приборостроение», т. V, 1962, № 4.
13. Воронцов В. Л., Москалев В. А., Нагибина И. М., Омельченко Д. И., Хесин Г. Л. Определение суммы главных напряжений с помощью интерферометров. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Труды 5-й Всесоюзной конференции 23—27 июня, 1964, Изд. ЛГУ, 1966.
14. Нагибина И. М., Приятелева Л. П. Полное исследование напряженного состояния прозрачных моделей. Изв. вузов. «Приборостроение», т. X, 1968.
15. Нагибина И. М., Герловин Б. Я. Оптическое устройство для определения главных напряжений прозрачной модели. Авт. свид. № 205 337. «Бюлл. изобр.», 1967, № 23.

Поступила в редакцию  
20/IX 1971 г.



## ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С ПОВЫШЕННЫМ КОНТРАСТОМ ДЛЯ РАССМАТРИВАНИЯ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

За последнее время в электронной промышленности в процессе производства интегральных схем начали широко использоваться специальные микроскопы и проекторы. Это объясняется тем, что операторам приходится иметь дело с деталями, размеры которых составляют доли миллиметра.

Качество интегральных схем зависит от контроля за совмещением контуров фотошаблона с контурами рисунка, нанесенного на полупроводниковой структуре. Совмещение рисунка фотошаблона с предварительно нанесенным на пластине кремния ступенчатым рисунком производится несколько раз с фотошаблонами различной конфигурации с точностью до 0,5 мкм.

Точность совмещения контуров шаблонов и объекта в настоящее время должна составить десятые доли микрометра, что приближается к величине предельной разрешающей способности оптических систем.

Ошибка на каком-либо этапе технологического процесса в результате неправильного наложения фотошаблона при множественности производимых операций и одновременном изготовлении целого комплекта интегральных схем может вызвать «закрывание» или «отсоединение» большинства элементов схем. Применяемые для этой цели микроскопы типа МБС-1 или МБС-2 не решают поставленной задачи, так как их увеличение составляет от 3,7\* до 88\*. При условии непрерывного наблюдения в окуляр оператор быстро утомляется и производительность его труда резко снижается.

Более удобным способом наблюдения является проекция объектов на экран. Однако проекционных приборов, пригодных для указанной выше цели, не имеется. Типовые проекторы обычно обладают недостаточным увеличением и не позволяют получать четкого изображения на экране элементов полупроводниковых структур из-за низкого контраста их изображения.

Очевидные преимущества проекции на экран несколько теряются из-за снижения разрешающей способности за счет зернистой структуры экрана. С учетом особенности полупроводниковых структур во ВНИИМ был разработан специальный проектор, в котором применен интерференционный контраст и вибрирующий экран

Низкий контраст изображения полупроводниковых структур объясняется тем, что они представляют собой фазовые объекты, отдельные участки которых имеют одинаковую отражательную

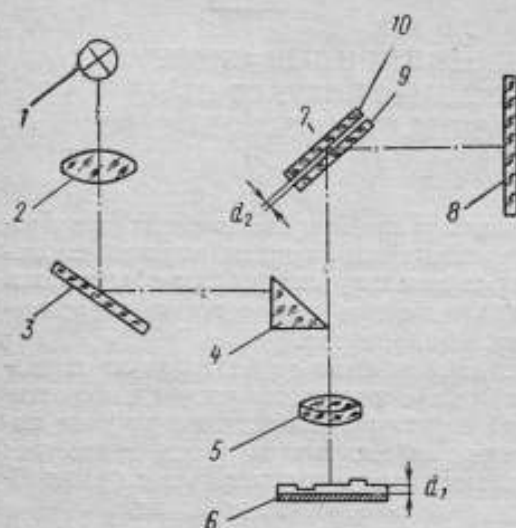


Рис. 1. Принципиальная схема проектора.

способность и отличаются только толщиной диэлектрического слоя. Отражение света от этих объектов не сопровождается изменением интенсивности, отразившиеся от различных участков пучки света приобретают только некоторую разность хода, и поле наблюдения кажется почти однородным. Изображение полупроводниковых структур на экране оказывается мало контрастным, а границы между соседними участками не резко выраженными.

Для увеличения контраста изображения полупроводниковых структур можно применить метод интерференционного контраста. Разрешающую способность проекционной системы можно увеличить, исключив структуру матовой поверхности экрана, которая вносит искажения в изображение.

Принципиальная схема проектора представлена на рис. 1. Свет от лампы накаливания 1 через конденсор 2 с помощью зеркала 3, призмы 4 и объектива 5 направляется на объект 6. Система устроена таким образом, что позволяет вести наблюдение в отраженном свете. Отразившись от объекта, свет с помощью объектива 5 попадает на интерференционный компенсатор 7 и затем — на экран 8. Интерференционный компенсатор состоит из светоделительной пластины 9 и отражающей пластины 10. Объект 6 представляет собой пластину металлического кремния, покрытую слоем окиси кремния  $\text{SiO}_2$ . Лучи, отразившиеся от полированной поверхности металлического кремния и прошедшие различные по толщине слои диэлектрика, приобретают разность

хода  $\Delta_1 = 2n_1d_1$ , где  $d_1$  — толщина диэлектрического слоя,  $n_1$  — показатель преломления диэлектрического слоя.

Эта разность хода лучей  $\Delta_1$  может быть компенсирована разностью хода лучей  $\Delta_2$  в воздушном промежутке между пластинами 9 и 10 интерференционного компенсатора. При отражении от этих пластин световые пучки приобретают дополнительную разность хода  $\Delta_2 = 2n_2d_2$ , где  $d_2$  — толщина воздушного промежутка,  $n_2$  — показатель преломления воздуха.

При помощи устройства для изменения зазора между пластинами можно добиться равенства разности хода световых пучков  $\Delta_1$ , отразившихся от объекта, и разности хода световых пучков  $\Delta_2$ , определяемой воздушным зазором в интерференционном

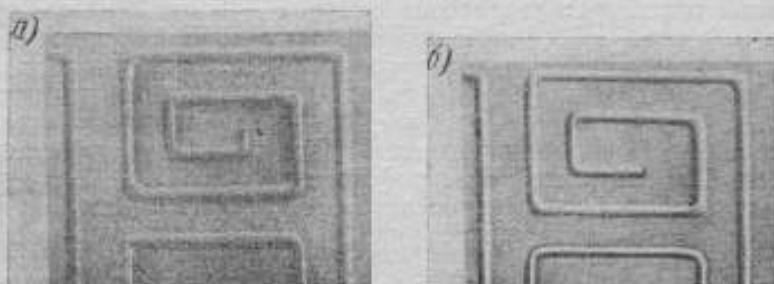


Рис. 2. Изображение участка полупроводниковой структуры:

а — на неподвижном экране без интерференционного контраста, б — на вибрирующем экране с интерференционным контрастом.

компенсаторе. В результате можно на экране б наблюдать интерференционную картину в белом свете, наложенную на изображение различных участков самого объекта, и особенно в местах наибольшего градиента изменения разности хода в объекте; при этом возникают интерференционные полосы, обрамляющие контуры объекта. Кроме того, повышается цветовой контраст между различными участками, благодаря чему они становятся лучше различимыми для наблюдателя.

Пластины 9 и 10 строго параллельны друг другу, и зазор между ними может плавно изменяться в пределах, соответствующих разности хода пучков, отраженных от объекта и, следовательно, может быть компенсирована любая разность хода лучей. Это дает возможность повышать контраст изображения полупроводниковых структур различной конфигурации.

Для повышения разрешающей способности проектора была применена вибрация матового экрана в плоскости изображения. Разрешающая способность проекционных систем снижается из-за нарушений, вводимых в изображение структурой матовой поверхности экрана. При вибрации матового экрана в плоскости

изображения с частотой, незаметной для человеческого глаза, и амплитудой, превышающей размеры микронеровностей матовой поверхности, нарушения, вводимые в изображение структурой матовой поверхности, уничтожаются. Разрешающая способность проекционных систем увеличивается в несколько раз по сравнению с системами с неподвижным экраном.

По приведенной выше схеме (см. рис. 1) разработан и изготовлен прибор, состоящий из трех отдельных блоков: основного осветительно-проекционного, расположенного на столе, экрана, укрепленного на специальной стойке, и звукового генератора для создания и регулировки вибрации экрана. Узел интерференционного компенсатора расположен над осветительно-проекционным блоком, непосредственно за объективом. Основные технические данные проектора: увеличение смещенное —  $100\times$  и  $50\times$ ; поле зрения —  $3\times 3$  мм<sup>2</sup> и  $6\times 6$  мм<sup>2</sup>; размер экрана —  $300\times 300$  мм<sup>2</sup>.

На рис. 2, а представлено изображение на экране участка полупроводниковой структуры без интерференционного контраста на неподвижном экране, а на рис. 2, б — на вибрирующем экране с интерференционным контрастом. Для количественной оценки увеличения контраста на микрофотометре типа МФ-4 было произведено микрофотометрирование полученных негативов. На основании измерения ординат записей микрофотограмм по формуле

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

был вычислен контраст изображения полупроводниковой структуры на экране проектора. При применении интерференционного компенсатора контраст изображения увеличивается в 2—2,5 раза.

Как показало исследование, применение интерференционного компенсатора значительно увеличивает контраст изображения фазовых объектов на экране проектора, а вибрация экрана повышает разрешающую способность, что позволяет повысить эффективность работы с приборами такого типа.

## О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОБЪЕКТИВНЫХ ПОЛЯРИМЕТРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ МОДУЛЯТОРАМИ

Использование фотоэлектронных приемных устройств во многих областях измерительной техники дало возможность не только значительно повысить точность измерений, но и разработать новые, ранее недоступные методы измерений. Особенно быстро начала развиваться спектрополяриметрия, когда стали легко осуществимы измерения в ультрафиолетовой области спектра.

По сравнению с визуальными объективные поляриметры для измерения угла вращения плоскости поляризации имеют ряд преимуществ, а именно: уменьшены погрешности измерений ( $0,005-0,001^\circ$ ) и сокращено время, затрачиваемое на измерения.

В современных точных объективных поляриметрах применяют модулированные потоки излучения [1], что приводит к повышению точности измерений. Модуляция потока происходит в результате того, что на анализатор падает линейно поляризованный свет с периодически меняющимся в пространстве положением плоскости поляризации. Изменение положения плоскости поляризации может происходить плавно или скачкообразно.

Конструкция и расположение узлов в каждом объективном поляриметре выбирается в зависимости от используемого метода модуляции. В общем виде схема объективного поляриметра представлена на рис. 1.

Широкое распространение получили модуляторы, которые создают угловое отклонение плоскости поляризации, изменяющееся во времени по синусоидальной зависимости (магнитооптический и электрооптический методы модуляции). В этом случае [2] поток излучения  $\Phi$ , выходящий из анализатора, оказывается модулированным с частотой, зависящей от частоты модуляции и взаимного расположения поляризатора и анализатора, и описывается приближенным выражением:



$$\Phi = \frac{\Phi_0}{2} (2k + 1 + \cos 2\theta - \alpha_0^2 \cos 2\theta + \alpha_0^2 \cos 2\theta \cos 2\omega t - 2\alpha_0 \sin 2\theta \sin \omega t), \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  — поток излучения, выходящий из поляризатора;  $k$  — коэффициент пропускания скрещенных поляризатора и анализатора;  $\theta$  — угол между плоскостями колебаний, пропускаемых поляризатором и анализатором;  $\alpha_0$  — угловая амплитуда модуляции — максимальное отклонение плоскости поляризации под воздействием модулятора от положения, заданного поляризатором;  $\omega$  — частота модуляции;  $t$  — время.

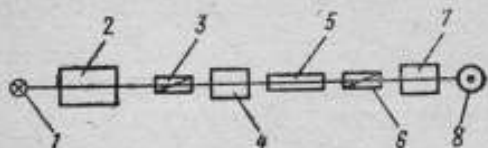


Рис. 1. Схема объективного поляриметра.  
1 — источник света; 2 — монохроматор; 3 — поляризатор; 4 — измеряемый объект; 5 — модулятор; 6 — анализатор; 7 — фотоэлектронный приемник с усилителем; 8 — индикатор.

отсутствует составляющая с частотой модуляции  $\omega$  (первая гармоника), когда плоскость колебаний электрического вектора в свете, выходящем из поляризатора, перпендикулярна плоскости колебаний, пропускаемых анализатором, т. е. при скрещенном положении поляризатора и анализатора. При этом индикатор на выходе избирательного усилителя, настроенного на частоту модуляции, дает нулевое показание.

Чаще всего в объективных поляриметрах применяют магнитооптический модулятор, основанный на эффекте Фарадея [3—7], состоящий из соленоида с прозрачным для световых лучей сердечником, материал которого обладает сравнительно большим значением постоянной Верде. Через обмотку соленоида пропускают переменный ток, вследствие чего плоскость поляризации проходящего через модулятор света отклоняется на некоторый угол то в одну, то в другую сторону относительно положения, заданного поляризатором.

Электрооптический модулятор представляет собой кристалл АДП с пластинкой «четверть волны» [8]. Линейно поляризованный свет, выходящий из исследуемого образца, падает на кристалл АДП, который находится под действием переменного электрического поля. В кристалле возникает двойное лучепреломление, величина которого меняется во времени в соответствии с изменением напряжения. Пластинка «четверть волны» превращает эллиптически поляризованный свет, выходящий из кристалла, в линейно поляризованный. Отклонение плоскости поляризации меняется синхронно с изменением напряжения, по-

даваемого на кристалл АДП. Таким образом, это устройство функционирует так же, как и магнитооптический модулятор.

В модуляторах, меняющих положение плоскости поляризации в пространстве скачкообразно [9], в качестве модулирующих элементов используют пластинки из кристаллического кварца, вырезанные перпендикулярно оптической оси. Эти пластинки, поочередно вводимые в световой пучок с помощью специального устройства, периодически меняют положение плоскости поляризации света, падающего на анализатор. Например, если в модуляторе чередуются пластинки из правого и левого кварца, то плоскость поляризации в один полупериод отклонена на определенную величину в одну сторону, а в другой — в другую сторону относительно положения, заданного поляризатором.

В поляриметре [10] скачкообразное изменение во времени потока излучения осуществлено с помощью устройства, направляющего на анализатор по отдельным каналам обыкновенный и необыкновенный лучи, выходящие из поляризатора, и заслонки, попеременно перекрывающей каждый из них. Таким образом, в один полупериод на фотопреобразователь падает обыкновенный луч, а в другой — необыкновенный. В этих случаях модулированный поток состоит из импульсов, форму которых можно считать прямоугольной, и его можно описать приближенным выражением

$$\Phi = \Phi_0 [k + \cos^2 \theta \cos^2 \alpha_0 + \sin^2 \theta \sin^2 \alpha_0 - \frac{2}{\pi} \sin 2\theta \sin 2\alpha_0 (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t)], \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  — половина угла, на который отличается положение плоскости поляризации света, падающего на анализатор в первый полупериод, от положения плоскости поляризации во второй полупериод (амплитуда модуляции).

Положению анализатора, при котором плоскость пропускаемых колебаний перпендикулярна биссектрисе угла  $2\alpha_0$ , соответствует угол  $\theta = \frac{\pi}{2}$  (скрещенное положение). При этом на фото-

приемник падают равные в первый и второй полупериоды потоки — переменная составляющая фотосигнала обращается в нуль.

Для объективных поляриметров с синусоидальной модуляцией, если пренебречь темновым током ФЭУ и шумами усилителей, минимальное обнаруживаемое отклонение от скрещенного положения поляризатора и анализатора, характеризующее чувствительность прибора [11], составляет

$$\delta = \sqrt{\frac{me \Delta f}{(m-1) \Phi_0 S_{\lambda}} \left( \frac{k^2}{\alpha_0^2} + 0,5 \right)}, \quad (3)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\Delta f$  — полоса пропускания усилителя;

$m$  — число каскадов усиления ФЭУ;  $S_\lambda$  — спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ.

Кривые на рис. 2 характеризуют зависимость чувствительности от амплитуды модуляции для различных значений  $k$ . На

оси ординат отложена величина  $A = \sqrt{\frac{k}{\alpha_0^2} + 0,5}$ ; на оси

абсцисс — амплитуда  $\alpha_0$  в градусах; величина  $\sqrt{\frac{me\Delta f}{(m-1)\Phi_0 S_\lambda}}$

является как бы масштабным фактором и при построении графика считалась равной единице.

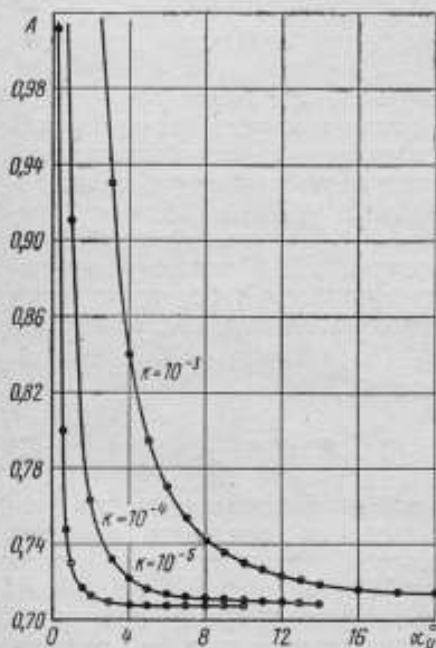


Рис. 2. Зависимость чувствительности от амплитуды модуляции для различных значений коэффициента пропускания (синусоидальная модуляция).

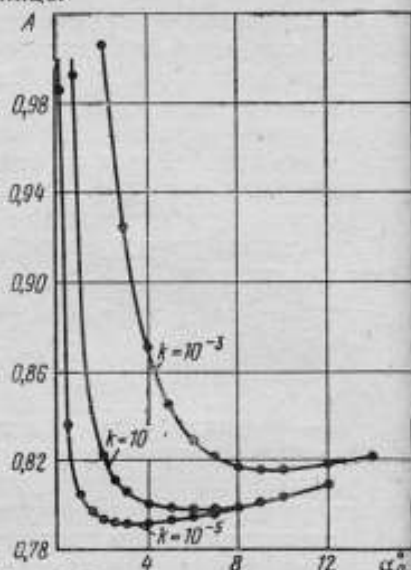


Рис. 3. Зависимость чувствительности от амплитуды модуляции для различных значений коэффициента пропускания (прямоугольная модуляция).

Для приборов с прямоугольной модуляцией [12], если усилитель переменного тока избирательный (выделяет только первую гармонику из фотосигнала), минимальное обнаруживаемое отклонение от скрещенного положения, характеризующее чувствительность

$$\delta = \sqrt{\frac{me\Delta f}{(m-1)\Phi_0 S_\lambda} \left( 1,25 \frac{k}{\alpha_0^2} + 1,25 \right)}. \quad (4)$$

При выводе выражения (4) темновым током ФЭУ и шумами усилителей пренебрегли.

Кривые на рис. 3 характеризуют зависимость чувствительности поляриметров данного типа от амплитуды модуляции для различных значений  $k$ . На оси ординат отложена величина

$$A = \sqrt{1,25 \frac{k}{\alpha_0^2} + 1,25}, \text{ на оси абсцисс — амплитуда } \alpha_0 \text{ в градусах.}$$

Как видно из рис. 2 и 3, с ухудшением качества поляризующих устройств, приводящим к увеличению количества рассеянного света в системе, для достижения наилучшей чувствительности нужно увеличивать амплитуду модуляции. Поскольку зачастую это технически трудно осуществимо, целесообразно уменьшать отношение  $k/\alpha_0^2$  за счет тщательного устранения рассеянного света. Из сопоставления рис. 2 и 3 следует, что при одних и тех же параметрах оптических и электронных устройств применение синусоидальной модуляции позволяет получить несколько большую (примерно на 10%) чувствительность прибора. Для получения высокой точности измерений предпочтительно применять устройства, создающие синусоидальную модуляцию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев В. И. Способ определения угла вращения плоскости поляризации света оптически активным веществом. Авт. свид. № 65654 от 14/1 1941, «Бюллетень изобретений» от 31/1 1946 г.
  2. Ильин Р. С., Федотов Г. И. Лабораторные оптические приборы, «Машиностроение», 1966.
  3. Bünnagel R., Ochring H. A. Messung der Rotationsdispersion an einem Quarz für die polarimetrische Bestimmung optischer Schwerpunkte. «Zeitschrift für Angewandte Physik», 1966, Bd. 20, № 5.
  4. Williamson S. J., Weingart J. M., Andrews R. D. New high precision photoelectric universal polarimeter and birefringence compensator, «Journal of the Optical Society of America», 1964, v. 54, № 3, p. 337.
  5. Billardon M. Méthode polarimétrique dans le visible et l'ultraviolet, «Annales de physique», 1962, v. 7, № 5—6, p. 233.
  6. Перекалина З. Б., Шнырев Г. Д., Миренский А. В., Пермогоров В. И., Кизель В. А. Фотоэлектрический спектрополяриметр для измерения вращения плоскости поляризации света в кристаллах. «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 6.
  7. Шаронов Ю. А. Автоматический спектрополяриметр, «Оптика и спектроскопия», 1968, т. XXV, № 6.
  8. Takasaki H., Isobe M., Masaki T., Konda A., Agatsuma T., Watanabe I. An automatic retardation meter for automatic polarimeter by means of ADP-polarization modulator, «Applied Optics», 1964, v. 3, № 3, p. 345.
  9. Gillham E. J., King R. J. New design of spectropolarimeter, «Journal of Scientific Instruments», 1961, v. 38, № 1, p. 21.
  10. Krüger H. Berichte der oberhessische Gesellschaft für Natur und Heilkunde «Naturwissenschaftliche abteilung», 1958, Bd. 29.
  11. Волкова Е. А., Сорокина И. С. Об измерении угла вращения плоскости поляризации объективным методом. Труды метрологических институтов СССР, 1970, вып. 114 (174).
  12. Bürer H., Günthard Hs. H. Empfindlichkeit von photoelektrischen Polarimetern, Helvetica chimica Acta, v. XVIII, Fac. III 1960, № 106.
- Поступила в редакцию  
20/IV 1971 г.

### ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Сущность метода фотоупругости состоит в том, что по сдвигу фаз параметров светового излучения можно судить о механических напряжениях, возникающих в прозрачных средах под действием внешних сил. Под действием этих сил среда становится двупреломляющей и сдвиг фаз между обыкновенным и необыкновенным лучом оказывается в некоторых пределах пропорциональным возникающим напряжениям.

Для многих материалов коэффициент пропорциональности (так называемый коэффициент фотоупругости) известен. Следовательно, измеряя сдвиг фазы света, можно определить величину напряжения.

Для изучения и измерения напряжений методов фотоупругости исследуемая деталь изготавливается из прозрачного материала с высоким коэффициентом фотоупругости. Метод фотоупругого анализа имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что большинство объектов непрозрачны, поэтому исследователь должен изготовить модель из прозрачного материала. На приготовление таких моделей затрачивается много времени. Кроме того, всегда имеются сомнения, насколько выводы, полученные при исследовании модели, применимы к исходному объекту. Предложенный А. Менаже в 1930 г. метод исследования деформаций и напряжений при помощи прозрачных оптически чувствительных покрытий, наносимых на поверхность непрозрачных деталей, получил за последние годы значительное развитие. Этот метод основан на том, что на исследуемой поверхности объекта монолитно с ним закрепляется тонкое покрытие из прозрачного материала, чувствительного к напря-



жениям. На прозрачное покрытие из оптически чувствительного материала направляется поляризованный свет, который, отразившись от зеркальной поверхности прозрачного слоя, пройдет этот же участок покрытия вторично. Величина двойного лучепреломления, полученная в оптически чувствительном покрытии, связана с возникающей в нем разностью главных деформаций. Путем измерения оптической разности хода определяют разность главных деформаций в покрытии и соответственно, по поверхности объекта.

Оптическая разность хода  $\Gamma$ , получающаяся после двукратного прохождения света через покрытие, связана с напряжением в покрытии зависимостью [5]

$$\Gamma = 2tB(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где  $\Gamma$  — оптическая разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей, нм;  $t$  — толщина покрытия, см;  $B$  — оптический коэффициент напряжения, нм·см/кг (в брьюстерах) — есть оптическая разность хода, возникающая при прохождении поляризованного света  $\lambda = 550$  нм через материал толщиной 1 см, в котором разность главных, нормальных к направлению луча, напряжений равна 1 кг/см<sup>2</sup>;  $\sigma_1, \sigma_2$  — главные напряжения в покрытии, кг/см<sup>2</sup>.

Следует отметить, что к материалам фотоупругих покрытий предъявляются требования высокой чувствительности к возникновению двойного лучепреломления, однородности и изотропности, отсутствия краевого эффекта, линейной зависимости между напряжениями, деформациями и оптическим эффектом. В настоящее время почти все материалы фотоупругих покрытий изготавливаются на основе эпоксидных смол.

Для различных исследований напряженного состояния горных пород с успехом используется метод фотоупругих покрытий. Для определения поверхностных деформаций в некоторых случаях фотоупругие покрытия наклеивали непосредственно на породы кровли или стенок выработок; в других случаях использовались фотоупругие преобразователи в виде полых или сплошных цилиндров, плотно зацементированных в скважине с целью определения напряжений в массиве.

Для измерения напряжений на некоторой глубине применяется метод так называемых фотоупругих преобразователей.

Фотоупругие преобразователи представляют собой стеклянные цилиндры определенной толщины, имеющие внутреннее отверстие. Применение стекол для определения напряжения позволяют получить сравнительно высокую точность измерения ввиду хорошей упругости и незначительной относительной деформации. Кроме того, стекло сохраняет постоянную фотоупругость очень длительный период времени. На задней поверхности цилиндрического преобразователя имеется зеркальный слой. Преобразователь бетонируется в монолитную часть исследуемо-

го массива и служит для долговременного контроля за распределением напряжений в массиве.

В преобразователе появляется сложное распределение напряжений, отождествляемое с картиной интерференции полос или изохром, наблюдаемых в поляризованном свете. Изохром представляют собой линии, геометрическое место точек которых соответствует равенству разностей главных напряжений в преобразователе.

Для рассмотрения интерференционной картины, локализованной в плоскости оптического преобразователя, могут быть использованы различного типа полярископы, работающие в отраженном свете. С помощью такого прибора поляризованный свет (любого состояния в зависимости от поставленной задачи исследования) направляется на оптический преобразователь, отразившись от его зеркальной стенки свет выходит в виде двух лучей, поляризованных в направлении действия главных напряжений, причем один из них запаздывает. Благодаря анализатору и компенсационному устройству измеряют запаздывание, называемое двойным лучепреломлением по формуле (1) и определяют положение главных напряжений.

На передней поверхности преобразователя могут быть нанесены две концентрические окружности, на которых отмечается ряд контрольных точек и производится измерение относительного изменения разности хода. Такой комплексный метод измерения горного давления был разработан коллективом Киотского университета [7].

Заметим, что разности напряжений для горных пород ориентировочно лежат в пределах  $10-2000$  кг/см<sup>2</sup> [5]. Задаваясь предельными напряжениями для горных пород, выясним, какие величины разностей хода будут появляться в оптических преобразователях, выполненных из различных сортов стекла [1]. Под действием напряжений оптически изотропное стекло становится анизотропным. Если стекло находится в простом напряженном состоянии (состояние одностороннего растяжения или сжатия), то по оптическому действию оно становится подобным одноосному кристаллу. Направление действия напряжений эквивалентно оптической оси кристалла. Мерой оптической анизотропии является разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей  $n_o - n_e$ , которая прямо пропорциональна величине главных напряжений

$$n_o - n_e = \frac{\Gamma}{t} (C_1 - C_2) (\sigma_1 - \sigma_2) = B (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (2)$$

где  $n_o$ ,  $n_e$  — показатели преломления лучей с направлением колебаний, соответственно перпендикулярных и параллельных направлению действия напряжений;  $t$  — толщина образца в направлении просмотра, см;  $C_1$ ,  $C_2$  — фотоупругие постоянные стекла, мм·см/кг.

Для стекол характерно более сильное изменение показателя преломления, если свет с колебаниями, перпендикулярными направлению действия напряжения ( $|C_1| < |C_2|$ ).

Фотоупругие постоянные и оптический коэффициент напряжений являются функциями состава стекла, длины волны света и характеризуют собой степень двойного лучепреломления стекла. Величина оптического коэффициента напряжений  $B$  для стекла различных марок каталога находится в пределах 0,65—3,9 брюстера [1, 2].

Задаваясь предельными разностями напряжений для горных пород, выясним, какие разности хода могут появляться в оптических преобразователях, выполненных из различных марок стекла. На рис. 1 по оси абсцисс отложены напряжения в  $\text{кг}/\text{см}^2$ ; по оси ординат — оптическая разность хода, отнесенная к единице толщины в  $\text{нм}/\text{см}$ . Тангенс угла наклона прямой  $\Gamma/t$  является оптическим коэффициентом напряжений.

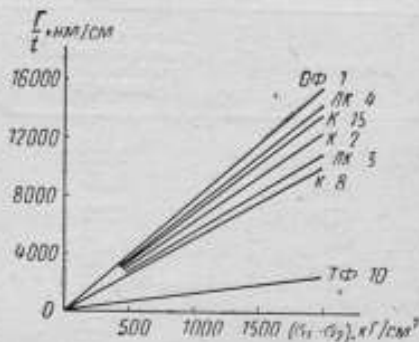


Рис. 1. Зависимость разности хода  $\Gamma$  в стекле от напряжений.

При принятых единицах измерения напряжений и разности хода оптический коэффициент напряжений измеряют в брюстерах. Как видно, стекла марок ОФ-1 и ТФ-10 имеют предельные значения оптических коэффициентов напряжения  $B=3,9$  и  $0,65$  брюстера. Внутри предельных прямых располагаются прямые, характеризующие все стекла каталога по оптическому коэффициенту напряжения. Использование для преобразователей стекла с более высоким коэффициентом  $B$  даст возможность проводить измерения с меньшей погрешностью.

Определим погрешности измерения при использовании стекла различной активности по двойному лучепреломлению. При определении оптической разности хода визуальным способом по интерференционным цветам погрешность измерения будет  $\sim 50$  нм, что по напряжению составит погрешность измерения в пределах 6—40  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

При определении разности хода компенсационным способом (используя компенсаторы типа Бабине или Сенармона) погрешность измерения будет  $\sim 5$  нм [6], а погрешность измерения напряжений — в пределах 0,5—4,0  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Для рекомендации рациональных сортов стекол был проведен анализ ряда других свойств, которые отрицательно влияют на работу преобразователей. На основе рассмотрения механических свойств стекла, его химической устойчивости можно прийти к выводу, что наиболее подходящим для изготовления преобразователей явля-

ются стекла с относительной твердостью по сошлифовыванию 1,0. Таким образом, из 104 марок каталога может быть использовано только 13, при этом пять из них не рекомендуется применять из-за их малой устойчивости к действию влажной атмосферы и пятняющих реагентов.

В таблице приводятся некоторые характеристики стекол, которые можно рекомендовать для изготовления оптических преобразователей.

Марка стекла	Оптический коэффициент напряжения $B$ при $\lambda=550$ мк, мм-см/кг	Модуль упругости (модуль Юнга) $E$ , кг/мм <sup>2</sup>	Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)
K2	3,20	7160	0,208
K20	3,10	7380	0,221
K14	2,90	7870	0,203
K18	2,90	7740	0,202
KФ8	2,90	7200	0,208
K5	2,70	7890	0,209
K17	2,70	8130	0,210
K8	2,65	8230	0,209

Очевидно, что наиболее рациональными для изготовления оптических датчиков являются боросиликатные кроны марки К и кронфлинт КФ8; их фотоупругая постоянная  $C_1$  мала по величине, фотоупругая постоянная  $C_2=0,3 \div 0,4 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/кг. Отметим, что боросиликатные кроны держат постоянную фотоупругости длительный период времени.

Рассмотрим влияние изменения ориентации главных направлений оптического преобразователя относительно полярископа на погрешность измерения. Проиллюстрируем это на примере измерения визуальным способом.

При измерении на поляриметре с компенсатором предполагается, что главное направление измеряемого образца составляет угол  $45^\circ$  с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором. В результате ошибки установки измеряемого образца его главное направление может составить угол  $45^\circ \pm \gamma$  с направлением колебаний поляризованного света. При изменении ориентации измеряемого образца вводится погрешность измерения.

Используя формулы [3], определяющие погрешность измерения разности фаз света при изменении ориентации главных направлений измеряемого образца при работе визуальным компенсационным способом (с компенсатором Сенармона или Бабине), можно построить эту зависимость на рис. 2. По оси абсцисс отложена измеряемая разность фаз  $\delta$ , по оси ординат — погрешность измерения  $\Delta\delta$  разности фаз  $\delta$ ; кривые построены

для различных погрешностей ориентации  $\gamma$  измеряемого образца.

На рис. 3 показана зависимость разности фаз ( $k\lambda \pm \delta$ ) от погрешности ориентации  $\gamma$  измеряемого образца, при которой погрешность измерения  $\Delta\delta$  достигает наибольшего значения. По оси абсцисс отложена погрешность ориентации  $\gamma$  измеряемого образца, по оси ординат — величина  $\delta$ , которая характеризует смещение максимума погрешности измерения  $\Delta\delta$  от точек  $k\lambda$  измеряемой разности фаз  $\delta$ . Экстремальные значения погрешности измерения  $\Delta\delta$  имеют место при  $90^\circ < \delta < 270^\circ$ .

На рис. 4 представлена зависимость наибольшей погрешности измерения  $\Delta\delta$  разности фаз  $\delta$  от погрешности ориентации  $\gamma$  измеряемого образца.

Таким образом, при измерении визуальным способом компенсации с помощью компенсаторов Сенармона или Бабине

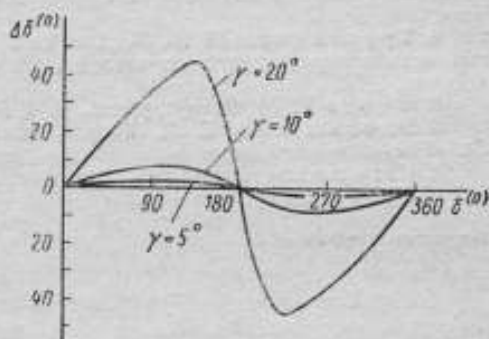


Рис. 2. Погрешность измерения  $\Delta\delta$  разности фаз  $\delta$  при изменении погрешности ориентации  $\gamma$  измеряемого образца.

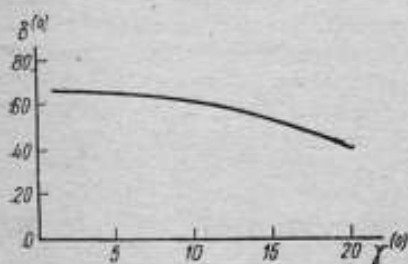


Рис. 3. Зависимость разности фаз ( $k\lambda \pm \delta$ ) от погрешности ориентации  $\gamma$  измеряемого образца, при которой погрешность измерения  $\Delta\delta$  достигает наибольшего значения.

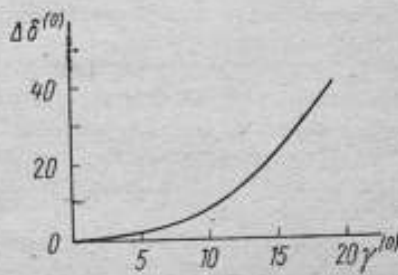


Рис. 4. Зависимость наибольшей погрешности измерения  $\Delta\delta$  разности фаз  $\delta$  от погрешности ориентации  $\gamma$  измеряемого образца.

предельная погрешность ориентации измеряемого образца не должна превышать  $3,5^\circ$ . При измерении визуальным способом по интерференционным цветам предельная погрешность ориентации измеряемого образца не должна превосходить  $13^\circ$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13659—68. Стекло оптическое бесцветное (физико-химические свойства; параметры).
2. Березина Е. Е. Оптический коэффициент напряжений стекол каталога оптического стекла. «Оптико-механическая промышленность, 1967, № 8».
3. Васильев Б. И. Оптика поляризационных приборов. «Машиностроение», 1969.
4. Турчанинов И. А., Медведев Р. В., Панин В. И. Современные методы комплексного определения физических свойств горных пород. «Недра», 1967.
5. Фрохт Н. М. Фотоупругость. Ч. I. Гостехиздат, 1948.
6. Эдельштейн Е. И. Координатно-синхронный поляриметр КСП-7. Сб. «Пол-оптический метод исследования напряжений», ЛГУ, 1966.
7. Hiramatsu and Oka. Journal of Mining and Metallurgical Institute of Japan. Jan. 1959, 75, 9—14.

Поступила в редакцию  
20/IX 1971 г.

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДИСПЕРСИИ ЖИДКИХ СРЕД

При определении концентрации различных двухкомпонентных растворов или жидких смесей широко использовались методы и приборы, основанные на измерении показателя преломления. Это можно объяснить простотой устройства рефрактометрических приборов, быстротой и высокой точностью измерения и рядом других преимуществ [1]. При этом следует особо подчеркнуть перспективность применения объективных способов измерения показателя преломления для различных длин волн и возможность непосредственного определения значения средней, частной или относительной дисперсии исследуемой среды. Сопоставление этих рефрактометрических данных с некоторыми другими физическими характеристиками среды позволяет производить количественный и качественный анализ сложных многокомпонентных систем [2].

В химическом анализе рефракционная дисперсия начала использоваться примерно с 1940 г. В настоящее время производят измерение дисперсии при оценке газойля [3], в процессе контроля очистки масел [4], при анализе продуктов деструктивной гидрогенизации бензола [5], для анализа эфирных масел [6].

Фундаментальное теоретическое обоснование дисперсионметрический способ получил в 60-х годах при определении качества бензинов в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. [7, 8]. Для определения количества ароматических углеводородов в бензинах ряд авторов [9, 10, 11] использовал вместо удельной дисперсии измерения относительной дисперсии. Однако по своей простоте и точности дисперсионный метод, разработанный в 1967—1968 гг. в Ленинградском государственном университете под руководством проф. Б. В. Иоффе, является наиболее эффективным.

Процентное содержание ароматических углеводородов в сырье платформинга определяют по средней дисперсии и показателю преломления для красной линии водорода. Погрешность метода составляет около 1,0% содержания ароматических углеводородов. Определенная последовательность операций этого метода позволяет найти не только процентное содержание ароматических углеводородов, но и нафтеновых и парафиновых углеводородов.

К недостаткам определения содержания суммарного количества ароматических углеводородов в бензинах методом сульфирования по ГОСТ 6994—54 и хроматографическим относится большая длительность и погрешность, достигающая 2—3% при флюоресцентной хроматографии. Результаты измерений на рефрактометрах, на приборах, измеряющих диэлектрическую проницаемость, а также на спектрометрах в ультрафиолетовой области спектра, сильно зависят от содержания сопутствующих компонентов и количественного соотношения различных видов ароматических углеводородов, что требует специальной калибровки каждого прибора по конкретным образцам продуктов. Все это вызывает дополнительные трудности в работе.

Процентное содержание ароматических углеводородов в сырье платформинга по дисперсионметрическому методу определяется следующей эмпирической зависимостью [7, 8]

$$A = K_D (D_{FC} - D_{FC\text{неар}}), \quad (1)$$

где  $K_D$  — постоянный коэффициент, величина которого выбирается определенной при контроле каждой фракции бензина (для сырья средневзвешенное расчетное значение  $K_D = 0,67$ );  $D_{FC\text{неар}}$  — дисперсионметрический коэффициент неароматической части исследуемого образца, равный  $194,4 \pm 0,5$ ;  $D_{FC}$  — дисперсионметрический коэффициент исследуемого образца

$$D_{FC} = \frac{n_F - n_C}{n_C - 1,04} \cdot 10^4, \quad (2)$$

$n_F - n_C$  — средняя дисперсия;  $n_F$  — показатель преломления для голубой линии водорода;  $n_C$  — показатель преломления для красной линии водорода; 1,04 — эмпирический коэффициент.

Поправочный член  $D_{FC}$  дает возможность исключить систематическую погрешность, возникающую вследствие возможных изменений процентного содержания парафино-нафтеновой части.

Из-за отсутствия достаточно простого и надежного способа измерения, а также объективного и точного прибора в настоящее время применение методов рефракционной дисперсионметрии ограничено. Выпускаемый отечественной промышленностью рефрактометр ИРФ-23 имеет ряд недостатков, а именно: необходимость высокой степени термостатирования ( $0,01$ — $0,05^\circ\text{C}$ ) и герметизации кюветы для работы с легкими бензиновыми фракциями, необъективность визуального метода отсчета, во многом зависящая от индивидуальных особенностей наблюдателя, недостаточная резкость границы раздела света и тени в поле зрения прибора, а также несовершенство осветительной системы. На основании изложенного выше в настоящее время можно считать первостепенной задачей создание нового способа и устройства для автоматического измерения дисперсии жидких сред — рефракционного дисперсионметра.

Из анализа формул (1) и (2) следует, что для определения содержания ароматических углеводородов в сырье платформинга с погрешностью  $\pm 1\%$  необходимо измерять среднюю дисперсию с погрешностью до  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  ед., а показатель преломления  $n_c$  — с погрешностью до  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  ед. Для требуемых в этом случае диапазонов измерения: средней дисперсии —  $2 \cdot 10^{-3}$  ед. и показателя преломления —  $2 \cdot 10^{-2}$  ед. относительная погрешность составит  $\pm 1\%$ .

В результате исследования различных способов и схем существующих отечественных и зарубежных автоматических рефрактометров установлено, что в основу рефракционного дисперсиометра целесообразно положить дифференциальный оптический метод. Он позволяет получить высокую точность, автоматизировать процесс измерения с помощью оптико-электронных устройств и легко стабилизировать температуру измеряемой жидкости.

Сущность дифференциального оптического метода (метод разностной призмы) заключается в измерении разности между показателями преломления образцовой и измеряемой жидкостями, т. е.

$$n_{\text{изм}} - n_{\text{обр}} = \pm \Delta n \quad (3)$$

или

$$n_{\text{изм}} = n_{\text{обр}} \pm \Delta n. \quad (4)$$

В соответствии с этим разность измерений средней дисперсии

$$(n_F - n_C)_{\text{изм}} = (n_F - n_C)_{\text{обр}} \pm \Delta n_F \pm \Delta n_C. \quad (5)$$

Как следует из выражения (5), разности средних дисперсий могут быть положительными и отрицательными, что должно быть учтено в автоматическом устройстве прибора.

Применение дифференциального метода измерения с учетом указанного выше небольшого диапазона измерений показателя преломления и дисперсии рабочих жидкостей, подлежащих исследованию, облегчает выбор образцовой жидкости. Кроме того, метод разностной призмы позволяет уменьшить степень стабилизации температуры с  $\pm 0,01$  до  $\pm 1^\circ\text{C}$  путем выбора образцовой жидкости, температурный коэффициент показателя преломления которой мало отличается от температурного коэффициента показателя преломления измеряемой жидкости.

Для определения точности стабилизации температуры жидкостей в кювете лабораторного полуавтоматического рефракционного дисперсиометра были проанализированы около десяти проб бензина, полученных от заводов, перерабатывающих нефть различных месторождений.

В качестве образцовой жидкости целесообразно принять чи-

Жидкость	$n_D^{20}$	$n_C^{20}$	$\Delta n_C^{20}$	$\Delta n_C^{20} \cdot 10^4$	Диапазон измерения для дифференциального метода		$\frac{\Delta n_C}{\Delta t} \cdot 10^4$	$\frac{\Delta n_C}{\Delta t} \cdot 10^4$	Дополнительная погрешность при изменении температуры на 1° С		
					$\Delta n_C \cdot 10^4$	$D(\Delta n_C) \cdot 10^4$			$\delta(\Delta n_C) \cdot 10^4$	$\delta(\Delta n_C) \cdot 10^4$	$\delta(D\Delta n_C) \times 10^4$
Исследуемые пробы бензина	1,40111—	1,3939—	72,1—	—	—	—	4,37—	—	—	—	—
	—1,42931	—1,4210	—83,1	—	—	—	—5,37	—	—	—	—
н-гептан	1,39249	1,38578	67,1	81,2— —352,2	50—161	5,14	5,04	от -0,70 до +0,25	от -0,66 до +0,22	0,4—0,3	
н-октан	1,40252	1,39562	69,0	от -17,2 до +253,8	31—140	4,85	4,82	от -0,48 до +0,47	от -0,36 до +0,52	1,2—0,5	
н-декан	1,41708	1,4099	71,8	от -160 до +110,0	3—112,0	4,55	4,48	от -0,14 до +0,81	от -0,06 до +0,82	0,8—0,1	

стые вещества, например из парафинового ряда: н-гептан, н-октан или н-декан. Эти вещества имеют приемлемые показатели преломления, а летучесть их при работе не внесет дополнительной погрешности. Для удобства выбора образцовой жидкости в таблице приведены показатели преломления и температурные коэффициенты указанных выше жидкостей для двух длин волн. Как видно, наименьшая погрешность от изменения температуры контролируемого продукта при дифференциальном методе измерения показателя преломления  $n_C$  будет, если в качестве образцовой жидкости взят н-октан, а при измерении средней дисперсии — н-гептан. Однако при одновременном измерении этих параметров (либо при положительных, либо отрицательных значениях приращений  $n_C$  и  $\Delta n_C$ ) в качестве образцовой жидкости целесообразно взять н-октан. В данном случае погрешность будет минимальной при условии выравнивания температур в обеих частях кюветы и ее стабилизации по номинальному значению до  $\pm 1^\circ \text{C}$ .



На погрешность измерения показателя преломления (или дисперсии) для определенной длины волны большое влияние оказывает способ выделения достаточно узкого спектрального интервала. Это является основной трудностью при создании полуавтоматических лабораторных и автоматических поточных рефракционных дисперсиометров.

Как известно, при измерении показателя преломления веществ при наличии дисперсии применяют монохроматические источники света или выделяют достаточно узкие спектральные интервалы из излучения источника белого света. Наиболее простыми с точки зрения возможности автоматизации процесса измерения являются методы, в которых используется интенсивный источник света и сменные интерференционные светофильтры.

Анализ существующих методов фотоэлектрической регистрации в автоматических рефрактометрах показал, что при погрешности относительных изменений  $n$  от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  вполне допустимо для автоматического метода измерения дисперсии использовать лампу накаливания с вольфрамовой нитью и узкополосные интерференционные светофильтры. Однако следует заметить, что выбираемые интерференционные светофильтры должны удовлетворять определенным требованиям: симметричности их спектральной характеристики и точному положению максимума выделяемого спектрального интервала в соответствии с выбранной длиной волны. Полуширина (порядка 8—10 нм) выделяемого спектрального интервала существенного влияния на точность измерения не оказывает. Допуск на смещение максимума этого интервала определяется заданной точностью измерения показателя преломления или средней дисперсии и зависит от вида кривой дисперсии измеряемого продукта.

При измерениях показателя преломления и средней дисперсии на линейных или близких к линейным участкам кривой дисперсии исследуемого вещества дифференциальным методом можно применять интерференционные светофильтры с значительным разбросом положения максимума выделяемого участка спектрального интервала без заметного увеличения погрешности. Исследованием различных сортов бензина установлено, что графики их дисперсий в видимой области спектра могут быть аппроксимированы почти прямыми линиями.

Среднее значение дисперсии пятнадцати различных проб бензинов вблизи голубой линии водорода (F) составляет  $0,7 \cdot 10^{-5}$  ед. на 0,1 нм, а вблизи красной линии водорода (C) —  $0,3 \cdot 10^{-5}$  ед. на 0,1 нм. Такой же характер имеют дисперсионные кривые образцовых жидкостей: *n*-гептана, *n*-октана и *n*-декана.

Следовательно, даже для абсолютных измерений показателя преломления  $n_c$  с погрешностью  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  ед. допустимое смещение максимума выделяемого интерференционным светофильтром спектрального интервала может составить  $\pm 6$ —7 нм. Это осуществимо с помощью интерференционных светофильтров отечественного производства.

Таким образом, средние значения дисперсий проб бензина и образцовых жидкостей для линий спектра (F) и (C) показывают, что в случае измерения показателя преломления  $n_c$  с указанной погрешностью можно пользоваться интерференционными светофильтрами с длинами волн в максимуме полосы пропускания, соответствующими как красной (C), так и голубой (F) линии водорода.

При измерении средней дисперсии этих же проб бензинов с допустимой погрешностью  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  ед. возможны различные комбинации интерференционных светофильтров по положению максимумов выделяемого спектрального интервала относительно линий (F) и (C).

Допустимое положение максимумов выделяемых спектральных интервалов в случае их смещения в разные стороны относительно линий (F) и (C), так же как и при абсолютных измерениях показателей преломления  $n_F$  и  $n_C$ , составляет  $\pm 0,2$  нм. Если максимумы полос пропускания для обоих интерференционных светофильтров смещены одновременно в сторону меньших или больших длин волн относительно  $\lambda_F$  и  $\lambda_C$ , то величина смещения для каждого светофильтра не должна превышать  $\pm 0,5$  нм. В этом случае согласно выражению (5) возможна компенсация погрешности измерения средней дисперсии ( $\delta$ ) при использовании светофильтров с еще большим смещением максимумов полос пропускания ( $\Delta\lambda$ ) при условии

$$\frac{dn_F}{d\lambda_F} \Delta\lambda_F - \frac{dn_C}{d\lambda_C} \Delta\lambda_C = [\delta]. \quad (6)$$

Или, подставляя при  $[\delta] = 0$

$$\frac{dn_F}{d\lambda_F} = 0,7 \cdot 10^{-5} \text{ ед./\AA} \text{ и } \frac{dn_C}{d\lambda_C} = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ ед./\AA},$$

получим

$$\frac{\Delta\lambda_F}{\Delta\lambda_C} = \frac{3}{7}, \quad (7)$$

где  $\frac{dn_F}{d\lambda_F}$  и  $\frac{dn_C}{d\lambda_C}$  — среднее значение дисперсии исследуемых проб соответственно для линий (F) и (C);  $\Delta\lambda_F$  и  $\Delta\lambda_C$  — допускаемое смещение максимумов кривой пропускания интерференционных светофильтров соответственно для линий (F) и (C);  $[\delta]$  — допустимая погрешность измерения средней дисперсии.

Следовательно, в каждом конкретном случае применения дисперсиометра, зная характер кривых дисперсии измеряемых жидкостей, можно значительно расширить возможности измерений. Нелинейность изменения разности показателя преломления образцовой и измеряемой жидкости от изменения угла отклонения светового пучка дифференциальной кюветой весьма незна-

чительна. Эта нелинейность для образцовой кюветы с преломляющим углом  $90^\circ$  и диапазоном измерения  $200 \cdot 10^{-4}$  ед. составляет около 2,5%. Однако данная ошибка может быть легко исключена, например, при прямом измерении средней дисперсии или значительно уменьшена при измерении показателей преломления путем правильного выбора схемы автоматического дисперсиометра. Недостаток дифференциального метода измерения заключается в том, что он применим только для прозрачных сред.

Принципиально в основу автоматического рефракционного дисперсиометра может быть положена схема любого автоматического рефрактометра с модуляцией светового потока и без нее, компенсационная схема или схема прямого отсчета. Однако при определении процентного содержания ароматических углеводородов по формулам (1) и (2) возникает необходимость в одновременном измерении средней дисперсии ( $n_F - n_C$ ) и показателя преломления ( $n_C$ ) с высокой точностью. Это потребует наличия в приборе одной кюветы, деления общего светового пучка на отдельные части и применения не менее двух фотоприемников. При разработке рефракционного дисперсиометра с фотоэлектрической регистрацией должны быть учтены все изложенные выше требования и выбраны оптимальные параметры отдельных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Госхимиздат, 1960.
2. Lüdde K. H. Die spezifische Refraktion von Mehrstoffsystemen. «Pharmazie», 1956, № 4.
3. Holmes A. Carbureting Values of gas oils and a new method for their evaluation. Industrial and Engineering Chemistry, 1932, 24, № 3.
4. Lien A. P., Evering B. L., Haesk F. W., Refining oils. Chemical Abstracts, 1952, 46.
5. Чжен Лу-бинь, Си Цзу-вэй. Метод анализа продуктов деструктивной гидрогенизации бензола, «Мэйтань яньцзюши яньцзю баогао цзюкань», 1958, № 2.
6. Иоффе Б. В., Баталин О. Е. Рефракционная дисперсия дезароматизированных нефтяных фракций, «Журнал прикладной химии», 32, вып. 12, 2723, 1959.
7. Иоффе Б. В., Баталин О. Е. Отклонения рефракционной дисперсии углеводородных смесей от аддитивности. «Журнал прикладной химии», 34, вып. 3, 603, 613, 1961.
8. Вишневский Н. Е. Ускоренный метод определения ароматических углеводородов, «Новости нефтяной техники». Нефтепереработка, 1956, № 7.
9. Ваха J. Charakterizovanie chromatografických frakcií olejov ramosop relativnej disperzie Ropa a Uhlie, 4, 196—198, 1962.
10. Трубинкова А. И. Ускоренный метод определения ароматических углеводородов в продуктах каталитического реформинга, «Нефтепереработка и нефтехимия», 1965, № 6.

Поступила в редакцию  
20/IX 1971 г.

О ДОПУСТИМОЙ ШИРИНЕ ЩЕЛЕЙ  
ПРИЗМЕННЫХ МОНОХРОМАТОРОВ

При исследовании распределения мощности излучения в сплошном спектре нагретых тел из-за недостатка лучистого потока на выходе монохроматора пользуются относительно широкими щелями. При этом возникает опасность появления дополнительных ошибок из-за несоответствия истинного значения спектральной плотности яркости  $b(\lambda_0)$  при длине волны  $\lambda_0$ , устанавливаемой по барабану монохроматора, ее измеренному значению  $b(\lambda_0)_{\text{изм}}$ . Чтобы погрешности измерения не превосходили заданных пределов, необходимо выбрать такие оптимальные размеры щелей, при которых сигналы, снимаемые с приемника излучения, были достаточны для получения требуемой точности регистрации.

Ниже излагается методика оценки допустимой ширины щелей по заданной допустимой погрешности измерения спектральной плотности яркости  $\left| \frac{\Delta b(\lambda)}{b(\lambda)} \right|_{\text{доп}}$

Величину  $b(\lambda_0)_{\text{изм}}$  можно представить в таком виде:

$$b(\lambda_0)_{\text{изм}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a(\lambda) b(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $a(\lambda)$  — аппаратная функция, нормированная по площади, исходя из условия [1]

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a(\lambda) d\lambda = 1, \quad (2)$$

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, определяющие ширину участка спектра, выделяемого монохроматором.

Ошибка измерения величин

$$\Delta b(\lambda_0) = b(\lambda_0)_{\text{изм}} - b(\lambda_0). \quad (3)$$

В общем случае входная и выходная щели монохроматора имеют разную ширину. Например, при малых потоках на выходе прибора увеличивают ширину выходной щели, оставляя входную неизменной, когда последние ограничена размером изображения исследуемого источника излучения. Этот случай характеризуется трапецидальной аппаратной функцией [1, 2], которая при условии (2) записывается в виде

$$a(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda - \lambda_1}{\Delta_1 \lambda \Delta_2 \lambda} & \lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda'; \\ \frac{1}{\Delta_1 \lambda} & \lambda' \leq \lambda \leq \lambda'', \Delta_1 \lambda > \Delta_2 \lambda; \\ \frac{\lambda_2 - \lambda}{\Delta_1 \lambda \Delta_2 \lambda} & \lambda'' \leq \lambda \leq \lambda_2, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Delta_2 \lambda$  — спектральная ширина выходной щели;  $\Delta_1 \lambda$  — спектральная ширина геометрического изображения входной щели;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, ограничивающих нижнее основание трапеции;  $\lambda''$  и  $\lambda'$  — длины волн, ограничивающих верхнее основание трапеции, причем

$$\begin{aligned} \lambda_2 - \lambda_1 &= \Delta_1 \lambda + \Delta_2 \lambda; \\ \lambda'' - \lambda' &= \Delta_1 \lambda - \Delta_2 \lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

Если спектральная ширина выходной щели больше спектральной ширины геометрического изображения входной щели, то  $\Delta_1 \lambda$  будет относиться к выходной, а  $\Delta_2 \lambda$  — к входной щели.

Подставив функцию (4) в выражение (1), получим

$$b(\lambda_0)_{\text{изм}} = \frac{1}{\Delta_1 \lambda \Delta_2 \lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda'} (\lambda - \lambda_1) b(\lambda) d\lambda + \frac{1}{\Delta_1 \lambda} \int_{\lambda'}^{\lambda''} b(\lambda) d\lambda + \frac{1}{\Delta_1 \lambda + \Delta_2 \lambda} \int_{\lambda''}^{\lambda_2} (\lambda_2 - \lambda) b(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

После разложения подынтегральных функций выражения (6) в ряд вокруг точки  $\lambda_0$ , интегрирования и подстановки пределов с учетом условий (5), получим

$$b(\lambda_0)_{\text{изм}} = b(\lambda_0) + \frac{b''(\lambda_0)}{24} [(\Delta_1 \lambda)^2 + (\Delta_2 \lambda)^2] + \dots; \quad (7)$$

где  $b''(\lambda_0)$  — вторая производная функций  $b(\lambda)$  в точке  $\lambda_0$ . Сумма всех последующих членов, содержащих  $\Delta_1 \lambda$  и  $\Delta_2 \lambda$  в 4, 6-й... степенях значительно меньше второго члена разложения, поэтому в (7) они отброшены.

Из выражения (3) и (7) для относительных ошибок измерения  $b(\lambda_0)$  находим

$$\left| \frac{\Delta b(\lambda_0)}{b(\lambda_0)} \right| = \frac{1}{24} \left| \frac{b''(\lambda_0)}{b(\lambda_0)} \right| [(\Delta_1 \lambda)^2 + (\Delta_2 \lambda)^2]. \quad (8)$$



Теперь можно опустить индекс «о» при обозначении длин волн, устанавливаемых по барабану монохроматора, и переписать выражение (8) в таком виде:

$$\frac{1}{2} [(\Delta_1 \lambda)^2 + (\Delta_2 \lambda)^2]_{\text{доп}} = 12 \left| \frac{\Delta b(\lambda)}{b(\lambda)} \right|_{\text{доп}} \left| \frac{b(\lambda)}{b''(\lambda)} \right|. \quad (9)$$

При равенстве щелей  $\Delta_1 \lambda = \Delta_2 \lambda = \Delta \lambda$  для допустимой ширины  $(\Delta \lambda)_{\text{доп}}$  из выражения (9) получаем

$$(\Delta \lambda)_{\text{доп}} = \sqrt{12 \left| \frac{\Delta b(\lambda)}{b(\lambda)} \right|_{\text{доп}} \left| \frac{b(\lambda)}{b''(\lambda)} \right|}. \quad (10)$$

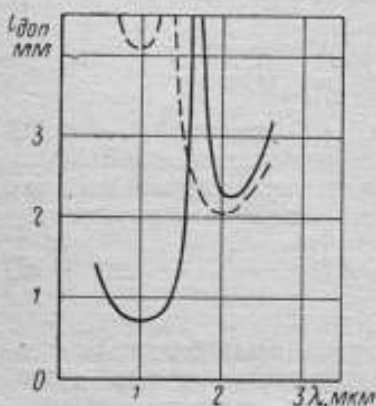


Рис. 1. Допустимые ширины щелей монохроматора ЗМР-3 со стеклянной призмой при  $\Delta T = \pm 10$  К.

—  $T = 1000$  К;  
- - -  $T = 3000$  К.

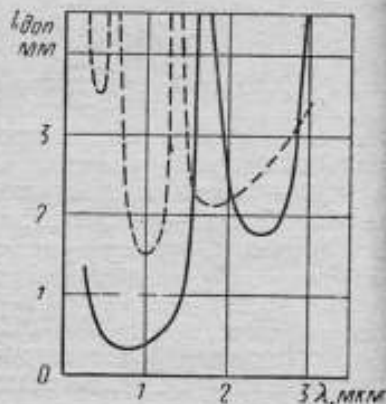


Рис. 2. Допустимые ширины щелей монохроматора ЗМР-3 с кварцевой призмой при  $\Delta T = \pm 10$  К.

—  $T = 1000$  К;  
- - -  $T = 3000$  К.

Как следует из выражения (9), при щелях разной ширины оценивается полусумма квадратов спектральных ширины щелей по допустимой ошибке измерения спектральной яркости  $\left| \frac{\Delta b(\lambda)}{b(\lambda)} \right|_{\text{доп}}$  или определяется допустимая ширина одной из щелей монохроматора по заданной величине другой.

При выборе допустимой ширины щели необходимо учитывать, что частная погрешность измерения, обусловленная конечным размером щелей, не должна превышать общую погрешность определения температуры более чем на 5%.

В расчетах по формулам (9) и (10) под функцией  $b(\lambda)$  следует понимать произведение пропускания атмосферы и прибора, дисперсии прибора, спектральной чувствительности приемника излучения и спектральной плотности яркости исследуемого источника. Величины допустимых щелей, вычисленные при использовании различных призм, позволяют количественно оце-

нить преимущество той или другой призмы для данной области спектра.

На рис. 1, 2 и 3 приводятся кривые зависимости линейных ширин щелей монохроматоров с призмами из кварца, стекла (ЗМР-3) и фтористого лития (ИКС-12) от длины волны. Эти кривые получены для излучения абсолютно черного тела при температурах 1000 и 3000 К без учета влияний атмосферных и аппаратурных искажений. Допустимые линейные ширины щелей (при равенстве входной и выходной щелей) вычислялись при условии, чтобы погрешности измерений за счет конечных размеров щелей не превосходили погрешности из-за неопределенности температуры  $\pm 10$  град более, чем на 5%. Как видно из рисунков, стеклянная призма обладает преимуществом перед кварцевой в области спектра 0,4—2 мкм, где допустимые ширины щелей монохроматора со стеклянной призмой оказываются большими; соответственно большими оказываются и потоки на выходе монохроматора. Отсюда следует также практическая целесообразность призм из фтористого лития, начиная с 2 мкм.

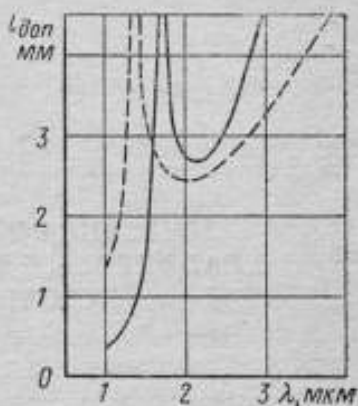


Рис. 3. Допустимые ширины щелей спектрометра ИКС-12 с призмой LiF при  $\Delta T = \pm 10$  К.

—  $T=1000$  К;  
 - - -  $T=3000$  К.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раутман С. Г. УФН, 66, 475, 1958.
2. Топорец А. С. Монохроматоры, Гостехиздат, 1955.

Поступила в редакцию  
 20/IX 1972 г.

### ЛЕНТОЧНАЯ ВОЛЬФРАМОВАЯ ЛАМПА С САПФИРОВЫМ ОКНОМ КАК ОБРАЗЦОВЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Ленточные вольфрамовые лампы широко применяются в фотометрических и пирометрических работах в качестве источников излучения с известным спектральным распределением яркости в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (примерно до 2,5 мкм). В связи с развитием инфракрасной техники за последние годы ощущается необходимость в создании надежных образцовых излучателей в области спектра до 5—6 мкм. Ленточные лампы не нашли применения в качестве образцовых излучателей в этой области по двум причинам: во-первых, из-за того, что лучеиспускательная способность вольфрама (или любого другого тугоплавкого металла) не исследована в данной области длин волн, и, во-вторых, стекло, используемое обычно для изготовления колб ламп, не пропускает излучение более 3 мкм.

В качестве образцового излучателя в области спектра до 5 мкм можно использовать ленточную вольфрамовую лампу с сапфировым окном. Сапфировая пластинка обладает неселективным пропусканием (около 85% при толщине 1 мм) от вакуумной ультрафиолетовой области спектра до 5 мкм [1] и определяет спектральную область образцового излучателя.

Технология изготовления вакуумной лампы не сложна и производится следующим образом. Вольфрамовая лента толщиной 0,03, шириной 1,5—2 и длиной около 25 мм сгибается в форме буквы П, концы которой свариваются через танталовые прокладки с молибденовыми электродами, впаянными в стекло ножки лампы. Средняя часть тела накала имеет длину порядка 15 мм и соответствует участку равномерного нагрева вольфрамовой ленты указанной длины. Сапфировая пластинка толщиной 1 мм приваривается к колбе лампы через переходное стекло марки А-54. Вольфрамовая лента перед монтажом отжига-

ется высокочастотным нагревом в вакууме при температуре  $1000^\circ\text{C}$  в течение 5 ч. В процессе откачки лампы лента обезгаживается пропусканьем через нее переменного тока до тех пор, пока в лампе не установится давление порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст. Затем лента отжигается при вакуумной установке при температуре, несколько превышающей  $2500\text{ K}$  в течение 2 ч. В момент отпайки лампы давление в ней обычно не должно превышать  $(5 \div 7) \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. На рис. 1 схематически изображен один из типов описываемого излучателя.

Изготовленная таким образом лампа была предварительно градуирована по истинным температурам при различных режимах электрического питания, например по способу, описанному в работах [2, 3]. Спектральная плотность излучения вычислялась по значениям лучеиспускаемой способности вольфрама, полученным в последние годы для области спектра  $0,23\text{--}5$  мкм [2, 4, 5] в широком интервале температур. Погрешность воспроизведения излучения описываемого источника в области  $0,4\text{--}2$  мкм не превышает  $1\text{--}2\%$ , а в более длинноволновой области  $5\text{--}7\%$ . Коэффициенты нормальной спектральной лучеиспускательной способности вольфрама в интервале температур  $1200\text{--}3200^\circ\text{K}$  могут быть вычислены по формуле

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{1}{3} \left\{ 2 \left[ \exp \left( \frac{c_2}{2\lambda_x T} \cos \varphi \right) + 1 \right]^{-1} \right\}^{2/3}, \quad (1)$$

$$\text{где } \cos \varphi = \frac{\lambda^2 - \lambda_x^2}{\sqrt{(\lambda^2 - \lambda_x^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}}; \quad c_2 = \frac{hc}{k} = 14\,388 \text{ град. мкм};$$

$h$ ,  $c$ ,  $k$  — фундаментальные постоянные;  $\lambda_x$  — характеристическая длина волны, равная для вольфрама  $1,24$  мкм;  $\gamma$  — декремент затухания коллективных колебаний свободных электронов вольфрама  $3,58$  мкм;  $\varphi$  — сдвиг фаз между действующей силой и вынужденными колебаниями электронов;  $T$  — истинная температура ленты.

Это соотношение хорошо описывает экспериментальные данные по лучеиспускательной способности вольфрама [6].

В табл. 1 приводятся значения эквивалентных температур вольфрама, соответствующие истинным температурам в интервале от  $1200$  до  $3200\text{ K}$ ; значения цветовых температур  $T_n$ , вычисленных по значениям лучеиспускательной способности  $\varepsilon(\lambda, T)$  при длинах волн  $0,47$  и  $0,65$  мкм, и яркостных  $T_n$  — при  $0,65$  мкм. Цветовые и яркостные температуры вычислены по значениям  $\varepsilon(\lambda, T)$ , полученным в работах [4, 7] и рассчитанным по формуле (1) [6] без учета пропускания окна. Как видно, значение  $T_n$  и  $T_n$  различных авторов имеют незначительные расхождения. Радиационные температуры  $T_p$  вычислены по значениям интегральной лучеиспускательной способности  $\varepsilon(T)$  [8, 9]. Значительное расхождение между этими температурами объяс-

няется тем, что в работе [8] значения  $\varepsilon(T)$  получены для излучения в полусфере, а в работе [9] — по нормали.

В практической пирометрии необходимо вводить поправки на пропускание  $\tau(\lambda)$  окна лампы. Значения эквивалентных тем-

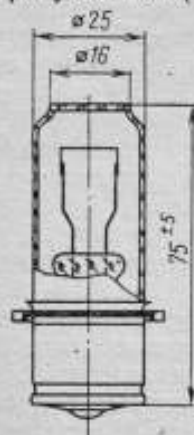


Рис. 1.

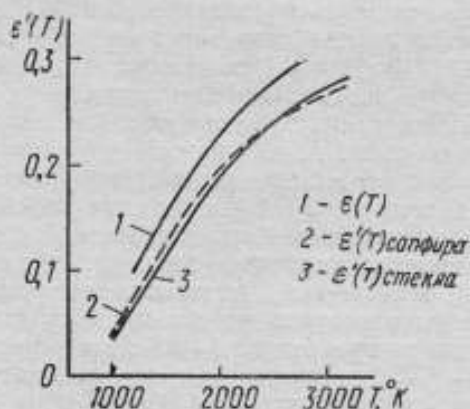


Рис. 2.

ператур для ламп с окном из сапфира ( $\tau=0,85$ ) и стекла ( $\tau=0,92$ ) представлены в табл. 2, в которой значения  $\varepsilon(\lambda, T)$  вычислены по формуле (1), а значения эффективной излучательной способности лампы с учетом пропускания окна — по формуле

$$\varepsilon'(T) = \frac{\int_0^{\infty} \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} b(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2)$$

Таблица 1

Зависимость эквивалентных температур от истинной, вычисленных по результатам различных авторов без учета пропускания окна

T, К	T <sub>н</sub> , К			T <sub>н</sub> , К			T <sub>р</sub> , К	
	[4]	[8]	[9]	[4]	[8]	[9]	[9]	[10]
1200	1151*	1150*	1154*	1208*	1205*	1208	735	671
1600	1512	1511	1516	1615	1613	1617	1079	1026
2000	1863	1859	1865	2024	2026	2028	1432	1382
2400	2201	2196	2201	2437	2446	2444	1782	1730
2800	2528	2521*	2525	2851	2874*	2863	2121	2072
3200	2843	2834*	2835	3269	3311*	3285	2474	2412

\* Вычислены по экстраполированным значениям  $\varepsilon(\lambda, T)$ .



Таблица 2

Эквивалентные температуры вольфрамовой ленточной лампы с окнами из сапфира и стекла

T, К	T <sub>в</sub> , К		T <sub>р</sub> , К		T <sub>ц</sub> , К
	сапфир $\tau=0,85$	стекло $\tau=0,92$	сапфир	стекло	
1200	1145	1149	624	601	1208
1400	1324	1330	803	782	1412
1600	1499	1508	980	962	1617
1800	1672	1682	1155	1140	1822
2000	1840	1852	1327	1317	2028
2200	2005	2019	1496	1491	2236
2400	2166	2183	1663	1663	2444
2600	2324	2344	1828	1832	2653
3000	2630	2655	2156	2167	3073
3200	2777	2805	2319	2332	3285

где  $b(\lambda, T)$  — функция Планка.

Значения  $e'(T)$  для вольфрамовых ленточных ламп с окнами из сапфира и стекла представлены на рис. 2. Здесь же приведена зависимость  $e(T)$  вольфрамовой ленты [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронкова Е. М., Дистлер Г. И., Гречушников Б. Н., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники, «Наука», 1965.
2. Дмитриев В. Д., Холопов Г. К. Спектральная лучеиспускающая способность вольфрама в инфракрасной области спектра. «Журнал прикладной спектроскопии», 1965, 2, 481.
3. Дмитриев В. Д., Холопов Г. К. Фотоэлектрический пирометр для измерения истинных температур вольфрама. Принцип работы и анализ погрешности измерения истинных температур. «Журнал прикладной спектроскопии», 1968, 8, 216.
4. De Vos J. C., «Physica», 1954, 20, 690.
5. Дмитриев В. Д., Холопов Г. К. Спектральная лучеиспускающая способность вольфрамовой ленты в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. «Журнал прикладной спектроскопии», 1967, 6, 425.
6. Дмитриев В. Д., «Теплофизика высоких температур», 1968, 6, 1134.
7. Laggabee R. D. Spectral Emissivity of Tungsten, JOSA, 1959, 49, 619.
8. Jones H. A., Langmuir J. The Characteristics of Tungsten Filaments as Functions of Temperature. J. E. Rev., 1927, 30, 354.
9. Дмитриев В. Д., Холопов Г. К. Интегральная лучеиспускающая способность вольфрама в интервале температур 1200—2800° К. «Журнал прикладной спектроскопии», 1965, № 3, 72.

Поступила в редакцию  
20/IV 1972 г.

### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Спектральная чувствительность  $S(\lambda)$  является одной из важнейших измерительных характеристик фотоэлектрических приемников излучения. Определение ее необходимо, в частности, при разработке новых типов катода, при выборе приемников для измерений в разных областях спектра, для расчета поправочных коэффициентов и исправляющих поглотителей.

Основным способом определения спектральной чувствительности указанных приемников является сравнение по спектру их показаний с показаниями неизбирательных приемников излучения. Ряд условий определяет при этом возможную точность измерений и последующее использование полученных значений  $S(\lambda)$ .

Для получения верных значений  $S(\lambda)$  при ее измерениях требуется, чтобы в оптико-механической части установки были обеспечены: точная установка длины волны, чистота спектрального интервала и отсутствие рассеянного света, действительная неизбирательность термоприемника в рабочем диапазоне спектра, линейность реакции обоих приемников, идентичность потоков излучения, падающих на оба приемника.

Нарушения линейности реакции приемников, обусловленные, в частности, для термоэлектрических приемников нелинейным ростом тепловых потерь с изменением температуры приемной поверхности, а для фотоэлементов — нелинейным ростом пространственных зарядов с изменением освещенности, — могут привести к неверным результатам измерений спектральной чувствительности и к невозможности использовать ее значения в дальнейшем, например, при измерении потоков излучения сложного спектрального состава. Оценивая возможные влияния нелинейных свойств приемников при определении  $S(\lambda)$ , следует учитывать, что пределы изменения монохроматических потоков

излучения, если не принять особых мер, могут составить несколько сотен раз в видимой и смежных областях спектра.

Требование идентичности потока излучения, падающего на оба приемника при их сравнении, подразумевает постоянство потока, излучаемого источником света, неизменность установленной по прибору длины волны и одинаковое использование всего монохроматического пучка каждым из приемников без потерь и при равномерном облучении их рабочих поверхностей. Равномерное облучение приемной поверхности исследуемого приемника или определенного ее участка является вместе с тем необходимым условием для воспроизведения полученных значений  $S(\lambda)$  и равномерного их использования в дальнейших измерениях с фотоэлектрическим приемником.

Погрешность измерений  $S(\lambda)$  зависит также от абсолютного уровня спектральных потоков излучения (обычно невысокого — 1—1,5 мкВт), в особенности в коротковолновой части спектра. Измерительная часть установки должна обладать достаточной чувствительностью и обеспечивать с предельной возможной точностью измерения малых термо-э. д. с. и фототоков от приемников с разным внутренним сопротивлением.

Созданная установка для определения спектральной чувствительности состоит из двойного кварцевого монохроматора, оптической приставки к нему и измерительной части.

Двойной монохроматор фирмы «Хилгер — Ваттс», модель D300, приведен вместе с входной зеркальной конденсорной системой D313; последняя обеспечивает заполнение входного коллиматорного зеркала монохроматора и равномерное распределение яркости в сечении выходного монохроматического пучка. Оптическая приставка на выходе монохроматора включает: термодетектор, с которым ведется сравнение, сменный исследуемый фотоэлемент, оптические детали, формирующие и направляющие выходящий из щели монохроматический пучок и механические устройства для крепления и юстировки приемников и оптики.

В измерительную часть установки входит аппаратура для приемников разного вида. Для измерений термо-э. д. с. служит потенциометр КЛ-48 (по Диссельхорсту); в качестве нулевого прибора применен фотогальванометрический компенсационный нановольтметр НФК-1 с предельной чувствительностью около  $5 \cdot 10^{-9}$  В/дел. Измерения термо-э. д. с. выполняются приблизительно до  $1 \cdot 10^{-8}$  В.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом применяются с усилителем постоянного тока мостового типа, с компенсацией изменений сеточного смещения. Измерительное устройство — пятидесятилетний магазин сопротивления в цепи компенсации. Предельные регистрируемые фототоки — около  $10^{-14}$  А. Для измерений  $S(\lambda)$  селеновых фотоэлементов применяется фотокомпенсационный гальванометрический усилитель Ф116/2.

Основные эксперименты по разработке оптической части установки относились к выходной оптической приставке. Идентичность потоков, падающих на сравниваемые приемники, очевидно, может быть обеспечена проще всего при одновременных или близких по времени измерениях с обоими приемниками и при одной и той же установке длины волны. Для экспериментальной проверки различных применяемых на практике методов [2, 3, 4, 5] было испытано три варианта.

Способ поворотного зеркала для поочередного освещения обоих приемников требует при осуществлении в силу малых раз-

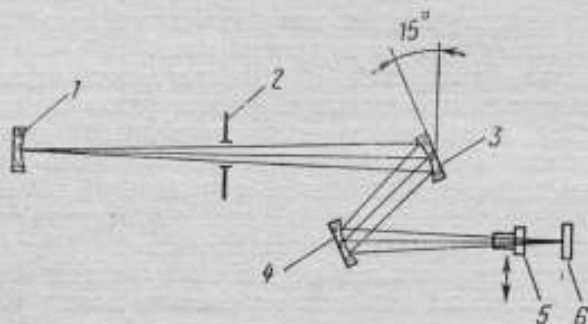


Рис. 1. Оптическая схема выходной приставки к монохроматору со сферическими зеркалами.

1 — коллиматорное зеркало; 2 — выходная щель; 3, 4 — сферические зеркала; 5 — фотозлемент; 6 — термоэлемент.

меров приемной площади применяемых термостолбиков, очень высокой механической точности поворота (до тысячных долей миллиметра), которую не удалось достигнуть.

Способ со светоделителем, позволяющий одновременно измерять реакции двух приемников, требует для светоделителя учета отношения  $\frac{\rho(\lambda)}{\tau(\lambda)}$ . Измерения этого отношения производи-

лись с помощью отдельного фотозлектрического устройства; однако применение последнего обуславливало дополнительную погрешность измерений и неизбежно замедляло их выполнение.

Окончательно была принята схема (рис. 1), в которой положение термостолбика и изображение на нем выходной щели монохроматора остается неизменным во все время измерений, а фотозлемент периодически вводится в пучок и выводится из него. Световой пучок направляется коллиматорным зеркалом 1 через щель 2 на два сферических зеркала 3, 4 диаметром 100 мм, с фокусным расстоянием 600 мм. Зеркала расположены под углом  $15^\circ$  к оптической оси и создают нужные изображения на рабочих поверхностях термостолбика и фотозлемента. Размеры соответствующих изображений составляют в среднем около

$9 \times \Delta$  (где  $\Delta$  — ширина выходной щели) и  $18 \times 20$  мм<sup>2</sup> и в некоторых пределах могут изменяться. Регулировка нужного положения и точная фокусировка светового пучка осуществляется с помощью микрометрических подвижек, которые имеются у обоих зеркал и держателей приемников. Термостолбик на столшке с микрометрическими подвижками устанавливается неподвижно по максимальному отсчету в начале серии измерений. Фотозлемент в светонепроницаемой камере перемещается по горизонтальным салазкам перпендикулярно оптической оси. Ходовой винт через ведущее колесо и ременную передачу связан со шкивом электродвигателя ДВА-УЗ. Выбор передачи и типа двигателя обусловлен требованиями устранения вибрации и шумов при перемещениях.

Движение фотозлемента автоматизировано и связано с действием заслонки, перекрывающей свет от выходной щели монохроматора. Устройство автоматического управления перемещением фотозлемента и заслонки, собранное в отдельном блоке, состоит из таймера, распределителя, схемы индикации и двух исполнительных механизмов (рис. 2). Полный цикл измерений включает два измерения в световом пучке (термоэ. д. с и фототока), четыре «темновых» измерения и два установочных интервала, необходимых для перемещения фотозлемента. Каждая из операций занимает 30 с, полное время измерений на одной длине волны — 4 мин. Применение программного трехступенчатого механического торможения обеспечивает при вводе фотозлемента в световой пучок погрешность не более  $\pm 0,05$  мм. При световом пучке, покрывающем значительную часть приемной поверхности фотозлемента, указанная погрешность не должна иметь существенного значения.

При испытаниях установки применялись различные источники света: светоизмерительная лампа накаливания СИС-107-1000, иодные и галогенные лампы ЛНИ-2 и КГМ-100, ленточная СИ-10-300. Напряжение питания или сила тока в них поддерживались с погрешностью не более 0,01%. Лампа ЛНИ-2 оказалась недостаточно устойчивой и была в дальнейшем исключена. В коротковолновой части спектра целесообразно применение ламп КГМ из-за повышенной мощности излучения.

Неизбирательность термоприемника пока строго не проверялась. Были проведены лишь сравнительные измерения нескольких термостолбиков разных типов. За основной принят вакуум-

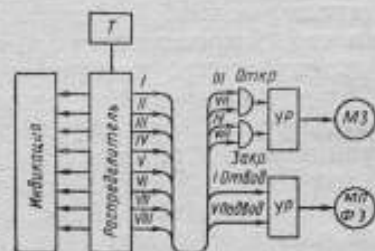


Рис. 2. Блок-схема устройства для автоматического управления перемещением фотозлемента и заслонки.

МПФЭ — мотор перемещения фотозлемента; УР — устройства реверса; МЗ — мотор заслонки.



ный термостолбик Хилгера FT-15 с приемной площадкой  $0,5 \times 9$  мм<sup>2</sup>, внутренним сопротивлением около 200 Ом, чувствительностью 28 В/Вт, постоянной времени около 0,3 с.

Двойная монохроматизация и диспергирующие характеристики спектрального прибора удовлетворяют требованиям чистоты спектра и точности установки длин волн. Измерения по спектру в пределах 0,4—1,0 мкм ведутся тремя ступенями с изменением размера щелей и соответственно спектрального интервала. Этим приемом одновременно уменьшают ширину спектрального участка и пределы измерений энергетической освещенности для приемников излучения. Предельные значения  $\Delta\lambda$  составляют около 3,5; 5 и 7,5 нм при 400, 600 и 1000 нм соответственно. Энергетическая освещенность в этих же условиях и участках спектра изменяется до 5—10 раз. Как известно [2, 3, 4, 5] для измерений на одном уровне освещенности довольно широко применяется выравнивание различными методами монохроматических потоков. Этим путем ослабляют влияние возможной нелинейности приемников излучения, а результаты измерений получают непосредственно в виде кривой  $S(\lambda)$ . В данной работе от такого пути отказались, чтобы не снижать чувствительность измерительной установки. Вместо этого линейность приемников, подлежащих испытаниям, проверяется на особой установке, в рабочем интервале измеряемых величин.

В процессе испытаний установки были проведены многократные измерения группы вакуумных фотоэлементов. Воспроизводимость измерений спектральной чувствительности составила приблизительно  $\pm 0,5$ — $1,0\%$  для средней части спектра и  $\pm 2\%$  — на его краях. Систематическая погрешность составит, вероятно, не свыше  $\pm 5\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bauer G. The sensitivity of non-linear detectors, «Appl. Optics», 1968, 7, pp. 1017—1021.
2. Avery D. G., Hammond P. H., A monochromator system with constant energy output in the 0,7(7  $\mu$  spectral region «J. Sci. Inst.», 1953, 30, № 11, pp. 400—401.
3. Mitsuhashi H. and Nakajima T. Apparatus for the study spectral response of photoelectric surface, «J. Phys. Soc. of Japan», 1956, 11, № 3, pp. 308—311.
4. Rapid calibration of photodetector response. «NBS Technical News Bulletin», 1967, v. 51, № 7, pp. 134—137.
5. Goebel D. G., Pool E. W. and Hartsock R. G. Instrument for measuring phototube spectral response. «Applied Optics», 1969, v. 8, № 8, p. 1749.

К. А. ДУДИНА,  
Н. С. МОСКАЛЕВА,  
Г. М. САХАРОВА  
ЛОМО

УДК 535.243.25.089.6

## ГРАДУИРОВКА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ СПЕКТРОФОТОМЕТРОВ

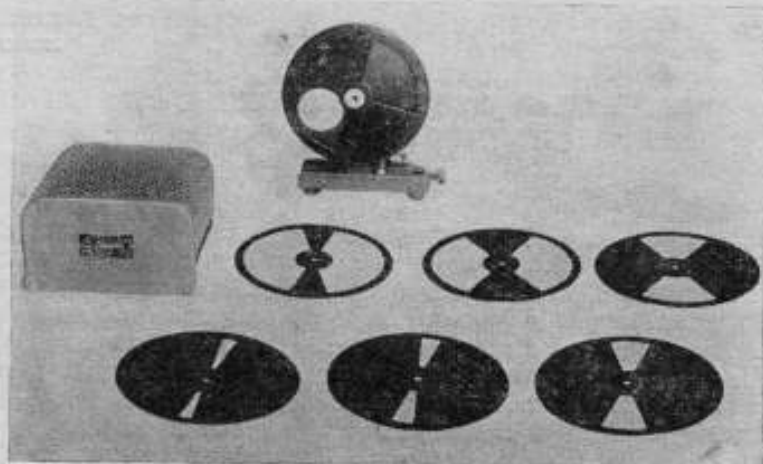
Для градуировки фотометрических шкал промышленных спектрофотометров используются разные методы в зависимости от конструкции и параметров прибора. Так, с самого начала выпуска регистрирующих и нерегистрирующих спектрофотометров применялся метод нейтральных светофильтров. Наборы из нейтральных светофильтров были аттестованы по пропусканию для видимой и ультрафиолетовой областей. Данные аттестации 1961 г. нуждались в подтверждении, однако из-за отсутствия спектральных установок поверка не могла быть повторена. Систематические расхождения между паспортными значениями коэффициентов пропускания контрольных светофильтров и показаниями выпускаемых спектрофотометров, а также начавшийся выпуск инфракрасных спектрофотометров явились причиной для поиска новых способов градуировки.

Основываясь на проведенных исследованиях и литературных данных [1—4], оптимальным был признан метод градуировки фотометрических шкал спектрофотометров с помощью вращающихся секторных дисков.

Преимущества вращающихся дисков перед нейтральными светофильтрами заключаются в том, что коэффициент пропускания их может быть рассчитан из геометрических размеров независимо от его фотометрической оценки и совершенно не зависит от длины волны. С этой точки зрения набор дисков можно рассматривать как абсолютно нейтральное средство для воспроизведения шкалы пропускания в ультрафиолетовой видимой и инфракрасной областях спектра. Коэффициент пропускания дисков стабилен во времени.

Единственным недостатком этого метода калибровки спектрофотометрической аппаратуры является ограничение в применении дисков в ультрафиолетовой области спектра, где с их помощью возможна калибровка только приборов с усилителями постоянного тока.

Калибровочный набор (см. рисунок) состоит из 6 или 7 дисков диаметром 170 мм, в каждом диске имеется по два идентичных секторных отверстия, вырезанных с большой точностью. Величина угла сектора определяет величину пропускания диска, при этом ошибка в изготовлении угла в  $10'$  вызывает погрешность  $0,1\%$  в диапазоне показаний пропускания  $10-100\%$  и  $0,2\%$  в диапазоне  $5-10\%$ .



Общий вид устройства с дисками.

Диски аттестовались в центральной измерительной лаборатории по величине угла секторного отверстия с погрешностью  $\pm 1'$ . Требования к точности изготовления дисков были определены с учетом погрешности показаний спектрофотометров, которая задается техническими условиями и составляет  $\pm 1\%$  пропускания. Погрешность воспроизведения шкалы пропускания дисками в 10 раз меньше погрешности спектрофотометра.

При проверке спектрофотометров диски укрепляются на оси электродвигателя постоянного тока ДПМ-25-Н1-02, смонтированного на стойке с защитным кожухом. Электродвигатель работает при напряжении  $U=27$  В, скорости вращения  $n=3800$  об/мин; питание его осуществляется от селенового выпрямителя ВУ 24/0,6. Частота прерывания потока дисками — 7600 раз в минуту.

Диски нашли применение для градуировки фотометрических шкал инфракрасных спектрофотометров и ультрафиолетовых типа СФ-4А, СФ-16; для градуировки же фотометрических шкал ультрафиолетовых спектрофотометров с усилителем переменного

Таблица 1

Пропускание поглоителя, %	Длина волны, нм					
	190			550		
	№ прибора					
	660003	680007	710193	660003	680007	710193
83,3	0,0	-0,5	-0,1	0,1	-0,3	-0,3
66,6	0,4	-0,3	0,1	0,2	-0,4	-0,2
50,0	0,0	-0,1	0,2	0,0	0,0	-0,1
33,3	0,0	-0,1	0,5	0,0	-0,1	0,4
16,6	0,3	0,1	0,5	0,2	0,3	0,5
8,3	0,3	0,0	—	0,2	0,1	0,5
5,5	-0,1	0,0	—	0,2	0,1	—

Продолжение табл. 1

Пропускание поглоителя, %	Длина волны, нм					
	750			1000		
	№ прибора					
	660003	680007	710193	660003	680007	710193
83,3	0,1	-0,3	-0,5	0,1	-0,3	-0,4
66,6	-0,2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4
50,0	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4
33,3	-0,4	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	0,0
16,6	0,1	0,4	0,3	0,0	0,4	0,1
8,3	0,0	0,5	0,3	-0,1	0,3	0,2
5,5	0,0	—	—	-0,1	0,4	—

го тока (типа СФ-8) использовались нейтральные светофильтры.

Были проградуированы три лабораторных спектрофотометра СФ-16. Отклонения значений шкалы пропускания спектрофотометров от паспортных значений дисков представлены в табл. 1. Как видно, наибольшее отклонение не превышает  $\pm 0,5\%$ , и при введении соответствующей поправки каждый из них может быть использован для аттестации нейтральных светофильтров.

Коэффициенты пропускания светофильтров, откалиброванных на СФ-16, сравнивались с пропусканиями, полученными на зарубежных спектрофотометрах «Кэри» модель 14 (США), «Юникэм» модель SP700 (Англия) и модель EPS-3 «Хитачи» (Япония). По результатам измерений, приведенным в табл. 2, видно, что показания спектрофотометра СФ-16 совпадают с показаниями зарубежных приборов более высокого класса точности.

Таблица 2

№ свето- фильтра	Спектрофотометр	Длина волны, нм					
		190	270	410	550	750	1000
2	SP700 («Юникам»)	46,9	77,4	82,8	86,0	87,0	87,7
	«Кэри» 14	45,3	76,4	82,4	84,8	86,3	86,4
	EPS-3 («Хитачи»)	—	76,8	83,0	85,2	88,4	88,6
	СФ-16	46,9	76,9	83,0	85,8	87,0	88,2
5	SP700 («Юникам»)	40,6	62,2	65,0	67,9	71,2	73,4
	«Кэри» 14	38,8	61,3	63,8	66,5	69,8	72,9
	EPS-3 («Хитачи»)	—	62,1	64,0	66,1	70,7	74,1
	СФ-16	40,4	61,7	64,3	66,9	70,6	74,2
8	SP700 («Юникам»)	34,9	51,7	49,6	48,2	48,0	49,0
	«Кэри» 14	33,8	50,6	48,4	46,8	46,7	48,5
	EPS-3 («Хитачи»)	—	50,8	47,6	46,3	47,6	50,3
	СФ-16	34,6	51,2	49,0	47,3	47,3	49,0
11	SP700 («Юникам»)	24,6	36,8	33,4	31,0	29,8	30,3
	«Кэри» 14	24,0	36,2	33,3	31,0	29,7	29,6
	EPS-3 («Хитачи»)	—	38,4	32,1	30,2	29,3	30,1
	СФ-16	24,9	36,6	33,5	31,1	29,8	29,9
14	SP700 («Юникам»)	10,4	14,9	13,0	11,8	10,4	9,9
	«Кэри» 14	10,4	15,0	13,6	12,3	10,6	9,1
	EPS-3 («Хитачи»)	—	13,6	12,1	11,9	9,9	8,3
	СФ-16	10,7	15,1	13,6	12,1	11,1	9,6

Для спектрофотометра СФ-16 по техническим условиям задана погрешность 1%, однако при изготовлении предусматривается некоторый запас в точности. Калибровка шкалы пропускания СФ-16 с помощью аттестованного набора секторных дисков с погрешностью 0,1—0,2% обеспечивает погрешность прибора 0,3—0,5%. Таким образом, откалиброванный спектрофотометр СФ-16 может быть использован для аттестации нейтральных светофильтров, для поверки спектрофотометров типа СФ-8 и для регистрирующих спектрофотометров других марок со спектральным диапазоном до 186 нм.

Учитывая, что калибровка приборов по дискам требует значительной затраты времени, было целесообразно аттестовать на поверенном по дискам приборе СФ-16 несколько наборов нейтральных фильтров и по ним производить приемочные испытания в цехах при их массовом выпуске. Светофильтры при этом должны поверяться не реже одного раза в год.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Fischer H., Nillins O. «Exptl. Techn. Phys.», 1961, v. 9, № 2, p. 68—74.
2. Slavin W. «J. Opt. Soc. Am.», 1962, 52, № 12, 1399—1401.
3. Stewart J. E. «Appl. Opt.», 1962, № 1, 75—77.
4. Kasson S. Gibson. Precision Measurement and Calibration. Nat. Bur. Stand. Handbook, 77, VIII, 1961.

Поступила в редакцию  
20/IV 1972 г.

## О ЦВЕТОВОМ ПОРОГЕ ОКОЛО БЕЛОГО ЦВЕТА

Измерение порогов цветоразличения составляет экспериментальную основу для построения метрики цветового пространства и системы допусков по цвету в различных областях промышленности. Хотя этому вопросу посвящен ряд работ [1—8], однако до настоящего времени нет точных данных, которые можно было бы использовать для решения конкретных задач. Например, использование пороговой единицы NBS [7] США часто приводит к несоответствию результатов расчета пороговых значений цветовых различий и непосредственных зрительных оценок\*. Причина этих несоответствий обуславливается зависимостью величины цветового порога от условий наблюдения, т. е. уровнем яркости, угловыми размерами поля зрения, способом наблюдения, цветом окружающего поля, адаптацией и т. д. Это явление, наблюдаемое в простых опытах, составляет основную трудность при решении проблемы порогов и поэтому не удивительно, что в литературе встречаются утверждения о невозможности построения строго равноконтрастного цветового пространства [9]. По-видимому, целесообразно устанавливать промышленные допуски, пользуясь порогами, измеренными в тех конкретных условиях наблюдения, в которых производится контроль цвета того или иного изделия и его практическое применение.

На практике часто приходится оценивать цветовые различия при дневном свете, в широком угле зрения двумя глазами и именно в таких условиях работают контролеры ОТК заводов, так как чувствительность глаза в этих условиях наиболее высока. Известно также, что глаз особенно остро различает малые изменения в цвете белых веществ и материалов. Поэтому порог цветоразличения около белого цвета в условиях наблюдения двумя глазами при дневном освещении представляет ту минимальную меру, которая имеет важное практическое значение как при формулировании требований к точности измерения на фотоэлектрических

\* См. статью К. А. Алексеевой и Е. Н. Юстовой «Новые таблицы для испытания цветного зрения» в настоящем сборнике, стр. 74.

компараторах цвета, так и точности аттестации контрольно-измерительных образцов цвета, относительно которых производится компарирование.

Для измерения этого порога в описанных выше условиях наблюдения была применена специально изготовленная вертушка Масквелла. Бумажный диск диаметром 30 мм, окрашенный цинковыми белилами, насаживался на ось вращения вертушки поверх двух других дисков диаметром 50 мм, из которых один также был окрашен цинковыми белилами, а другой — цинковыми белилами с небольшой примесью пигмента. Оба больших диска имели прорези вдоль радиуса и в этом месте цветной диск задвигался за белый таким образом, что его часть выступала в виде сектора на большом круге. Соотношение секторов белого и подкрашенного дисков могло быть изменено по желанию наблюдателя.

При приведении вертушки во вращение, когда исчезают мелькание, наблюдатель должен регистрировать минимальные различия в цвете между центральным диском и окружающим его периферическим кольцом. Это достигалось путем проб, так как соотношение цветов на больших дисках нельзя было изменить в процессе вращения. Результаты измерений регистрировались по 360-градусной шкале, расположенной на кольце неподвижного круга.

Для вертушки было изготовлено 12 съёмных дисков, окрашенных цинковыми белилами с добавлением различных пигментов для получения различных оттенков приблизительно в порядке чередования цветов спектра. Различия в цвете между белым диском и цветными были незначительны. Тем самым обеспечивалась высокая степень точности при оценке порога (малым изменениям в цвете соответствовали большие отсчеты по вертушке). Координаты цвета дисков приведены в табл. 1, а на рисунке показаны их цветности.

Измерения первого порога были выполнены восемью наблюдателями в солнечный день у северного окна (при освещенности 550 лк); затем они были повторены в пасмурную погоду также у северного окна (при освещенности 770 лк\*). Каждым наблюдателем произведено по три измерения.

В табл. 2 приведены средние результаты измерения (в %) восемью наблюдателями. Пороги по всем двенадцати направлениям от центрального белого к цветному характеризовались отношением абсолютного изменения координаты к величине самой координаты, т. е.  $\frac{\Delta\bar{x}}{\bar{x}}, \frac{\Delta\bar{y}}{\bar{y}}, \frac{\Delta\bar{z}}{\bar{z}}$ .

Среднее значение величины цветового порога около белого цвета получилось равным приблизительно 1% по всем направлениям в цветовом пространстве, при этом изменение уровня ярко-

\* Увеличение освещенности в пасмурную погоду у северного окна объясняется светорассеянием облачного неба.

Таблица 1

Координаты цвета дисков вертушки при источнике света С (ГОСТ 7721—61)  
(рассчитаны по данным спектрофотометрических измерений)

№ диска	Подкрашивающий пигмент	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$\bar{x}$	$y$
1	Кадмий лимонный	85,36	89,84	87,86	0,3245	0,3415
2	Кадмий желтый средний	88,00	91,32	89,79	0,3270	0,3393
3	Сиена натуральная	86,33	89,05	88,98	0,3266	0,3368
4	Кадмий красный светлый	86,80	88,72	95,40	0,3204	0,3275
5	Кадмий оранжевый	87,41	89,24	96,31	0,3202	0,3269
6	Кобальт фиолетовый светлый	81,77	82,67	91,98	0,3189	0,3224
7	Кобальт фиолетовый темный	79,24	81,50	92,58	0,3128	0,3217
8	Ультрамарин	81,52	85,09	96,31	0,3100	0,3236
9	Кобальт синий	77,10	81,05	90,97	0,3095	0,3253
10	Марганцевая голубая	78,34	83,58	93,17	0,3071	0,3264
11	Изумрудная зеленая	75,52	80,83	88,72	0,3082	0,3298
12	Кобальт зеленый светлый с холодным оттенком	72,37	78,71	84,25	0,3075	0,3345

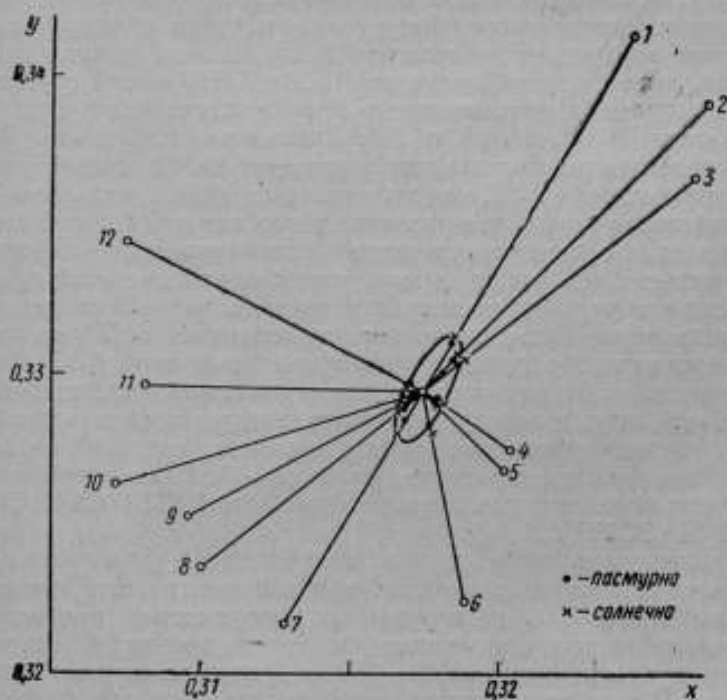
Таблица 2

Результаты измерений порогов цветоразличения около белого цвета при источнике С (в %)

№ диска	Пасмурный день, северное окно			Солнечный день, северное окно		
	$\frac{\Delta x}{\bar{x}}$	$\frac{\Delta y}{\bar{y}}$	$\frac{\Delta z}{\bar{z}}$	$\frac{\Delta x}{\bar{x}}$	$\frac{\Delta y}{\bar{y}}$	$\frac{\Delta z}{\bar{z}}$
1	1,1	1,1	1,7	1,3	1,3	2,0
2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	1,5
3	0,6	0,6	1,6	0,7	0,7	1,7
4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7
5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9
6	1,6	2,0	1,6	2,0	2,4	2,0
7	1,8	2,0	1,1	2,3	2,5	1,5
8	0,8	0,7	0,3	1,3	1,2	0,5
9	0,7	0,7	0,5	1,3	1,2	0,8
10	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,8
11	0,8	0,7	0,6	0,8	0,7	0,6
12	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
Среднее:	0,9	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1

Результаты измерения порогов в солнечный день у северного окна (в угл. град)

№ диска	Наблюдатели							
	ИНП	НМН	КАА	ЕНЮ	ГВП	ИЗП	ЛВП	ТПС
1	80	75	35	90	50	60	15	50
2	55	50	55	110	25	45	15	20
3	45	35	30	100	20	20	80	80
4	55	50	50	80	30	70	20	85
5	75	70	60	110	25	65	35	40
6	110	120	80	120	45	35	50	45
7	75	95	105	60	100	20	65	40
8	40	50	65	70	45	65	20	20
9	25	25	60	45	45	5	60	10
10	20	25	10	30	10	10	25	15
11	25	35	25	30	15	5	10	10
12	20	25	15	20	10	10	10	10



Координаты цветности 12 цветных дисков при источнике С и пороговой эллипс около белого цвета



Таблица 4

Результаты измерений порогов цветоразличения  
около белого цвета при источнике С  
в солнечный день (в %)

Наблюдатель	$\frac{\Delta x}{\bar{x}}$	$\frac{\Delta y}{\bar{y}}$	$\frac{\Delta z}{\bar{z}}$
ЛВП	0,1	0,1	0,4
ЕНЮ	7	6	9
КАА			
ИНП	0,3	0,3	0,3
НМН			

сти в вышеуказанных пределах и спектрального состава источника освещения, как оказалось, не имело существенного значения. Результаты этих измерений наглядно иллюстрируются на графике цветности (см. рисунок). В координатах цветности средние результаты измерения порогов  $\Delta x=0,002$ ;  $\Delta y=0,004$ .

В табл. 3 даны полученные в солнечный день средние отсчеты по шкале вертушки в угловых градусах. Из этих данных можно сделать вывод, что наблюдатели ЛВП и ЕНЮ в этой группе занимают крайние положения по остроте цветоразличения. Наблюдатели ИНП, НМН и КАА являются типичными. Если преобразовать результаты измерения этих наблюдателей в координатную систему XYZ, как это сделано в табл. 4 для диска № 2, то становится ясным, что различие в порогах по разным направлениям (как средний результат измерения группы из восьми человек) меньше, чем различие между наблюдателями этой группы.

Если при усреднении данных исключить резко отличающиеся по своим результатам измерения наблюдателя ЕНЮ, то значение порога цветоразличения следует принять равным 0,3%. Однако, принимая во внимание то, что существуют наблюдатели с еще более острым цветоразличением, следует повысить требования к точности измерения малых цветовых различий на фотоэлектрических компараторах цвета до 0,1. Этим требованиям отвечают отечественные компараторы цвета ЭКЦ-1 (ВНИСИ) и ФКЦ-Ш (ЗОМЗ).

Сравнение цветового порога, полученного в указанных выше условиях измерения, с порогом, который имеет место при измерениях белого цвета на визуальных колориметрах, при монокулярном наблюдении на черном фоне в угле зрения  $10^\circ$  при уровне освещенности порядка 100—150 лк представляет несомненный интерес. В этих последних условиях определялся основной стандарт колориметрии — функции сложения цветов. Как известно из практики измерений на колориметре системы ГОИ, порог цве-

торазличения в среднем составляет по координатам  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  величину порядка  $\frac{\Delta x}{\bar{x}} = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = 3-5\%$ , а по координате  $\frac{\Delta z}{\bar{z}}$  он может достигать  $5-7\%$ \*, т. е. в 10 раз превышает порог цветоразличения в наиболее благоприятных условиях наблюдения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Judd D. A. Maxwell triangle yielding uniform chromaticity diagram. JOSA, № 4, 1935, v. 25, p. 24.
2. Mac Adam D. L. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight. JOSA, v. 32, № 5, 1942, p. 247.
3. Раутвая Г. Н. Пороги цветоразличения, ДАН т. 92, № 5, 1953.
4. Brown W. R. J. Color Discrimination of Twelve Observers, JOSA, v. 47, № 2, 1957, p. 137.
5. Brown W. R. J. The Effect of Field Size and Chromatic Surroundings on Color Discrimination, JOSA, v. 42, № 11, 1952, p. 837.
6. Wyszecki G. Matching Color Differences, JOSA, v. 55, № 3, 1955, p. 223.
7. Wyszecki G. and Wright H. Field Trials of the 1964 CIE Color Difference Formula, JOSA v. 55, 1965, p. 1165.
8. Wyszecki G. Recent Developments on Color-Difference Evaluations. National Research Council of Canada Division of Physics, Ottawa, 1971.
9. Richter M. Official German Standard Color Chart, v. 45, № 3, 1955, p. 223.

Поступила в редакцию  
20/XI 1971 г.

\* Эти результаты были подтверждены измерениями авторов.

НОВЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
ЦВЕТНОГО ЗРЕНИЯ

Известно, что в цветном зрении людей, наряду с резко выраженными недостатками, такими как дихромазия, монохромазия и аномалия, наблюдаются также различия в остроте цветоразличения. В ряде профессий возникает потребность в критериях, характеризующих цветоразличительную способность людей.

Согласно теории Юнга-Гельмгольца цветовое зрение человека определяется работой трех зрительных приемников глаза, кривые спектральной чувствительности которых были определены в специально поставленных колориметрических опытах [1, 2, 3]. Колориметрическая система, связанная непосредственно с реакцией приемников, на излучение известна как физиологическая система  $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$ . Функции сложения цветов в этой системе (см. рис. 1) выражают относительные кривые спектральной чувствительности приемников глаза.

Различного рода нарушения цветового зрения возникают при изменении кривых спектральной чувствительности приемников. Эти изменения могут выражаться в искажениях формы кривых и в общем снижении чувствительности отдельных приемников (предельные случаи соответствуют выпадению приемников). В первом случае имеет место так называемая аномалия цветового зрения, при которой наблюдатели не принимают цветовых равенств, установленных лицами с нормальным цветовым зрением. Следовательно, для таких лиц обычная колориметрия, основанная на кривых сложения нормальных наблюдателей, не пригодна и подбор цветных тестов для их обнаружения должен производиться спектрофотометрическим методом. В практике для этой цели обычно предлагается уравнять спектральный желтый цвет смесью спектральных зеленого и красного (равенство Рэлея).

Во втором случае дефект цветового зрения называется цветослабостью и в крайних формах, когда один или два приемника

полностью утрачивают чувствительность, имеет место соответственно дихромазия и монохромазия.

Классификация форм цветного зрения, основанная на теории Юнга-Гельмгольца, дана в работах Г. Н. Раутиана [4]. Если дихроматы и цветослабые принимают цветовые равенства, устанавливаемые нормальными трихроматами, что свидетельствует и подтверждает отсутствие качественного различия кривых чувствительности действующих у них приемников нормального трихромата, то для построения рациональных цветных тестов в этом случае применим метод колориметрии.

Как известно, нормальные трихроматы составляют каждый цвет из трех цветов колориметра единственным способом. Для дихромата же существует множество вполне определенных сочетаний цветов колориметра, которые кажутся ему неразличимыми с измеряемым цветом. Эти не различимые дихроматом цвета располагаются в цветовом пространстве вдоль прямой линии, причем направление прямой не зависит от выбора измеряемого цвета. Для каждого типа цветовой слепоты (протанопии, дейтеранопии и тританопии) семейства прямых имеют свои характерные направления. Это и означает, что цветовое пространство дихроматов двумерно. Измерение не различимых дихроматами цветов позволяет определить [1, 2, 3] физиологическую систему  $\vec{R}_0 \vec{G}_0 \vec{B}_0$  нормального трихромата.

У цветослабых чувствительность приемников понижена по сравнению с чувствительностью нормального трихромата, и поэтому не все цвета, расположенные вдоль соответствующей прямой в цветовом пространстве, кажутся ему неразличимыми. Степень ослабления функционирования того или иного приемника можно характеризовать предельными парами едва различимых цветов, расположенными на прямых, параллельных осям физиологической системы. За меры цветослабости следует принять число порогов цветоразличения нормального трихромата между этими парами цветов.

Такая методика применена в аномалоскопе ГОИ [5] для определения цветослабости. Начиная с объективного равенства двух

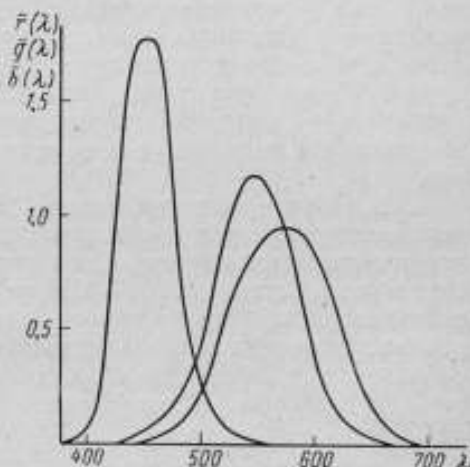


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности  $\vec{R}$ ,  $\vec{G}$ ,  $\vec{B}$ .

смежных полей зрения аномалоскопа, цвет одного поля постепенно изменяют в заданном направлении до тех пор, пока испытуемый не заметит разницы. Испытания производятся по трем направлениям. Шкалы прибора проградуированы в порогах нормального трихромата.

Обычно при испытаниях цветового зрения используют цветные таблицы, которые более просты в обращении. Поэтому целесообразно для определения цветослабости разработать таблицы, основанные на принципе, примененном в аномалоскопе ГОИ. В соответствии с изложенным выше настоящая работа разделена на три этапа: подбор и стандартизация цветных тестов в виде не различимых дихроматами цветов, определение числа порогов нормального наблюдателя между этими парами и оформление тестов.

1. Выбор цветových пар. Колориметрическая методика построения таблиц для обнаружения различных типов дихроматии и контроля за качеством подбора цветов в существующих таблицах разработана в 1951—1952 гг. [5, 6, 7]. В целях стандартизации тестов подбор не различимых дихроматами пар в данной работе производился по колориметрическому атласу ВНИИМ [8], содержащему 450 цветов, аттестованных по международной системе XYZ для трех стандартных источников цвета А, В и С (ГОСТ 7721—61).

В физиологической системе  $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$  два цвета с координатами  $\vec{r}_1\vec{g}_1\vec{b}_1$  и  $\vec{r}_2\vec{g}_2\vec{b}_2$  не различаемые дихроматами, но различаемые наблюдателями с нормальным цветовым зрением должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \text{для протанопов} \quad & \vec{r}_1 \neq \vec{r}_2, \vec{g}_1 = \vec{g}_2, \vec{b}_1 = \vec{b}_2; \\ \text{для дейтранопов} \quad & \vec{r}_1 = \vec{r}_2, \vec{g}_1 \neq \vec{g}_2, \vec{b}_1 = \vec{b}_2; \\ \text{для тританопов} \quad & \vec{r}_1 = \vec{r}_2, \vec{g}_1 = \vec{g}_2, \vec{b}_1 \neq \vec{b}_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Как известно, система  $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$  связана с системой  $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$  уравнениями преобразования [3]:

$$\begin{aligned} \vec{R}_0 &= 1,79 \vec{X} + 0,603 \vec{Y} + 0 \vec{Z}; \\ \vec{G}_0 &= -1,00 \vec{X} + 0,395 \vec{Y} + 0 \vec{Z}; \\ \vec{B}_0 &= 0,211 \vec{X} + 0,002 \vec{Y} + 1,00 \vec{Z}. \end{aligned}$$

Не различимые дихроматами цвета легко найти в атласе графическим методом. Для этого цвета атласа следует представить в двух проекциях на плоскости  $\vec{x}\vec{y}$  и  $\vec{x}\vec{z}$  и, наметив проекции физиологических осей  $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$ , отметить те цвета, которые в обеих проекциях лежат на прямых, параллельных этим осям. Таким



способом в атласе было найдено семьдесят пар цветов, не различимых дихроматами в условиях вечернего (источник А) и дневного (источник С) освещения.

В качестве примера в табл. 1 и 2 даны координаты цвета в системе  $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$  и в  $\bar{R}_0\bar{G}_0\bar{B}_0$  пар цветов, которые были использованы

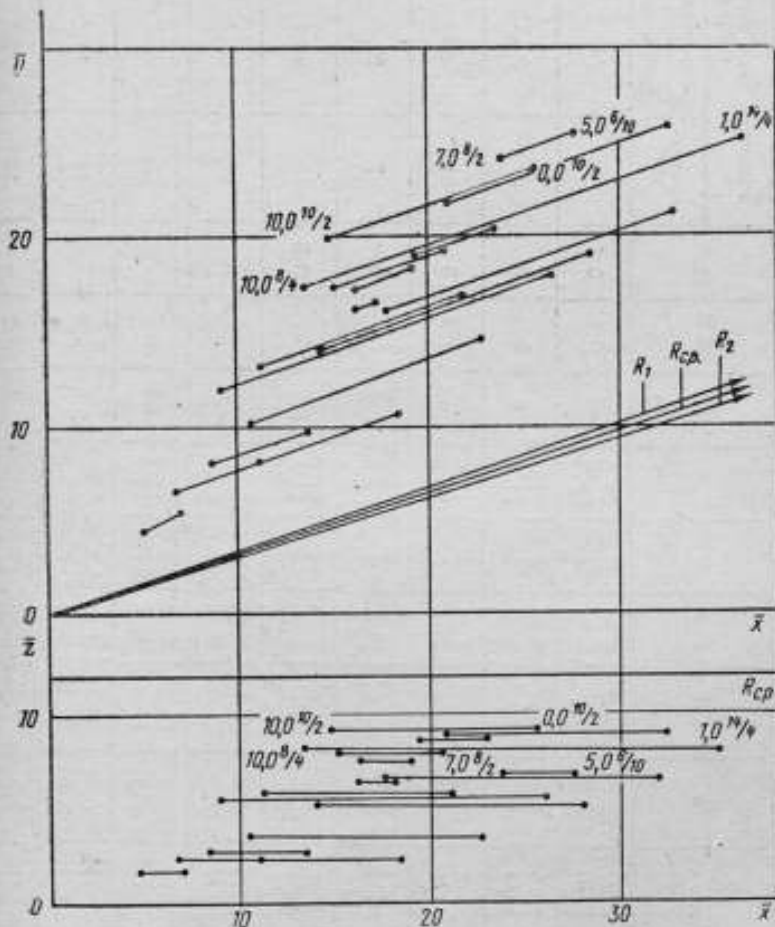


Рис. 2. Цвета, не различимые проаномали при источнике А.

для построения тестов, а также погрешности  $\delta$ , с которыми выполнялись условия неразличимости [1]. На рис. 2—5 (в двух проекциях) эти цвета представлены графически. Там же проведены проекции физиологических осей  $\bar{R}_0$  и  $\bar{G}_0$  и показаны возможные их вариации, которые являются следствием индивидуальных осо-

Таблица 1

Цвета, не различные дихроматами при источнике А

№ пары	Соблаженные по атласу	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}=\bar{z}$	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\delta r, \%$	$\delta g, \%$	$\delta b, \%$	Различие в паре, выраженные числом порогов			
										измеряемой	вычисленное по формуле Вышкаго Неккерсона		
Прогнозы	I	7,0 5,0	23,7 27,8	24,3 25,6	6,84 6,81	25,5 27,3	22,9 23,0	—	0,5	0,4	9	16	9,16
	II	0,0 10,0	10/2 14,7	23,6 20,0	9,08 9,08	25,1 19,1	21,4 21,4	—	0	0	20	54,2	33,9
	III	10,0 1,0	8/4 14/4	13,2 36,2	17,5 25,4	8,15 8,15	16,8 29,8	18,6 18,8	—	1,2	0	61	109
Действительные	I	8,0 0,0	2/2 4/2	7,10 8,42	8,24 7,81	8,24 8,30	8,28 7,09	0,7	—	0,9	7	20,1	14,5
	II	8,0 15,0	10/6 10/10	20,8 23,5	21,9 20,6	8,78 8,73	22,4 22,2	21,2 18,0	1,2	—	13	29,1	17,4
	III	16,0 6,5	12/2 12/8	33,6 27,9	24,8 27,4	9,80 9,80	28,4 28,7	19,3 25,5	0,9	—	21	51,1	30,0
Тригглеры	I	7,0 9,0	4/8 4/12	13,3 13,4	12,3 13,2	3,95 4,95	13,9 13,8	12,4 12,3	0,6	0,6	5	2,7	4,88
	II	6,0 13,0	2/12 4/4	6,47 6,64	6,19 6,16	2,04 5,01	6,55 6,38	5,67 5,83	2,6	2,8	12	11,4	17,0
	III	9,0 13,0	2/10 8/6	10,5 10,6	10,3 10,3	3,63 8,07	10,3 10,6	9,58 9,95	0,6	3,8	19	14,1	17,3

Цвета, не различные дихроматами при источнике С

№ пары	Обозначение по Глазу	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}=\bar{b}$	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\delta \bar{r}, \%$	$\delta \bar{g}, \%$	$\delta \bar{b}, \%$	Различие в паре, выраженное числом люменов				
										измеряемое	вычисленное по формуле Нинкертсона			
Програнты	I	2,0 3,0	8/8 10/2	17,6 16,1	15,9 15,6	18,1 17,8	16,3 15,6	15,4 15,6	—	1,3	1,68	8	9,6	5,6
	II	5,0 6,5	2/10 2/2	16,3 9,60	18,9 16,8	11,8 11,0	18,6 21,9	19,5 18,6	—	0,51	0,85	20	39,6	30,2
	III	8,0 2,0	2/2 4/2	6,42 23,3	8,99 14,6	8,57 9,05	7,25 16,6	10,1 10,1	—	0,6	5,6	60	105	63,8
Дейтранны	I	2,0 9,0	2/8 6/8	17,6 14,8	15,9 17,1	18,1 18,4	16,3 16,3	15,3 18,3	0,0	—	1,6	14	28,3	20
	II	6,0 4,0	6/6 8/6	25,2 32,2	31,7 29,1	20,3 20,0	30,5 30,6	33,6 26,8	0,33	—	1,5	25	46,3	34
	III	3,0 4,7	2/4 2/10	23,1 17,0	15,6 18,2	6,73 6,74	18,5 18,6	11,4 17,7	0,54	—	0,15	32	67,5	40,4
Триганны	I	4,0 14,0	4/14 4/10	10,2 10,6	9,65 9,61	7,10 17,2	9,97 8,39	9,17 9,89	5,8	4,3	—	16	25,4	28,7
	II	4,0 2,0	2/12 8/8	13,3 13,5	11,7 11,6	5,24 12,3	12,6 12,2	10,5 10,7	2,0	2,1	—	24	27,6	21,1

бенностей цветного зрения дихроматов [3]. Как известно, направление третьей оси  $\vec{B}_0$  было определено теоретически [9]. Эта форма дихромазии — тританопия — встречается чрезвычайно редко и поэтому экспериментальных данных по определению оси  $\vec{B}_0$  нет, графики тританопических пар здесь опущены.

2. Пороговое выражение цветовых различий. Существует много равноконтрастных цветовых систем и соответственно формул для выражения цветовых различий [10], но так

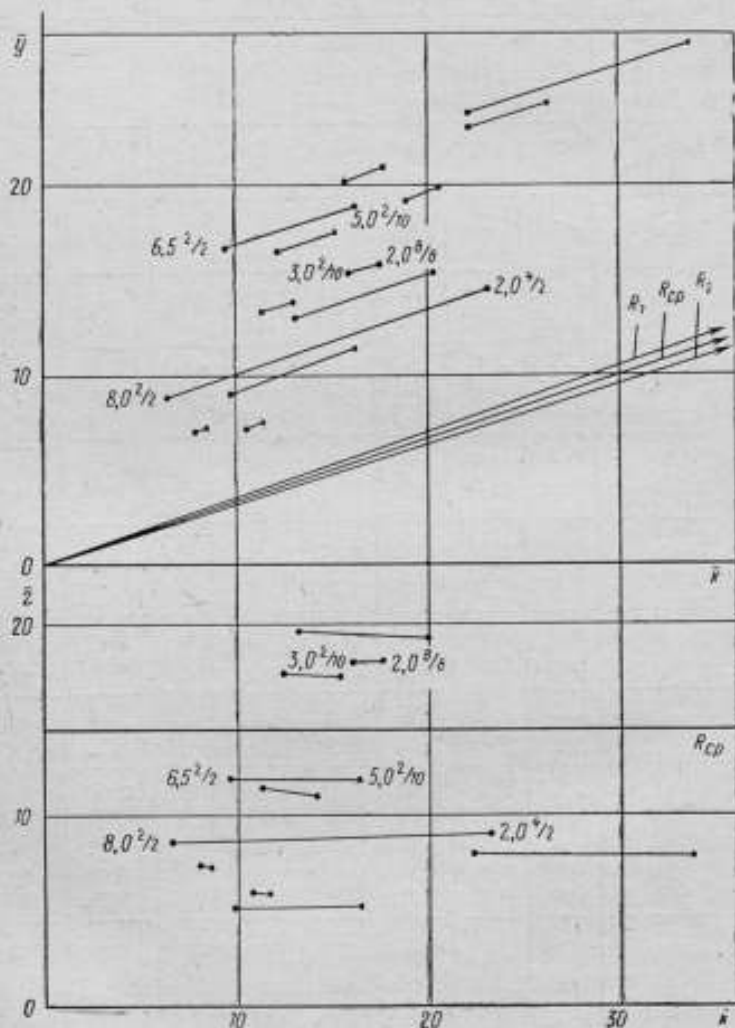


Рис. 3. Цвета, не различимые протанопами при источнике С.

как величина цветового порога в значительной степени определяется условиями наблюдения в каждом конкретном случае, оценку цветовых порогов целесообразно производить путем прямых измерений.

В данном случае число порогов между парами не различных дихроматами цветов измерялось на вертушке Максвелла. Заметим, что пользуясь вертушкой, можно производить измере-

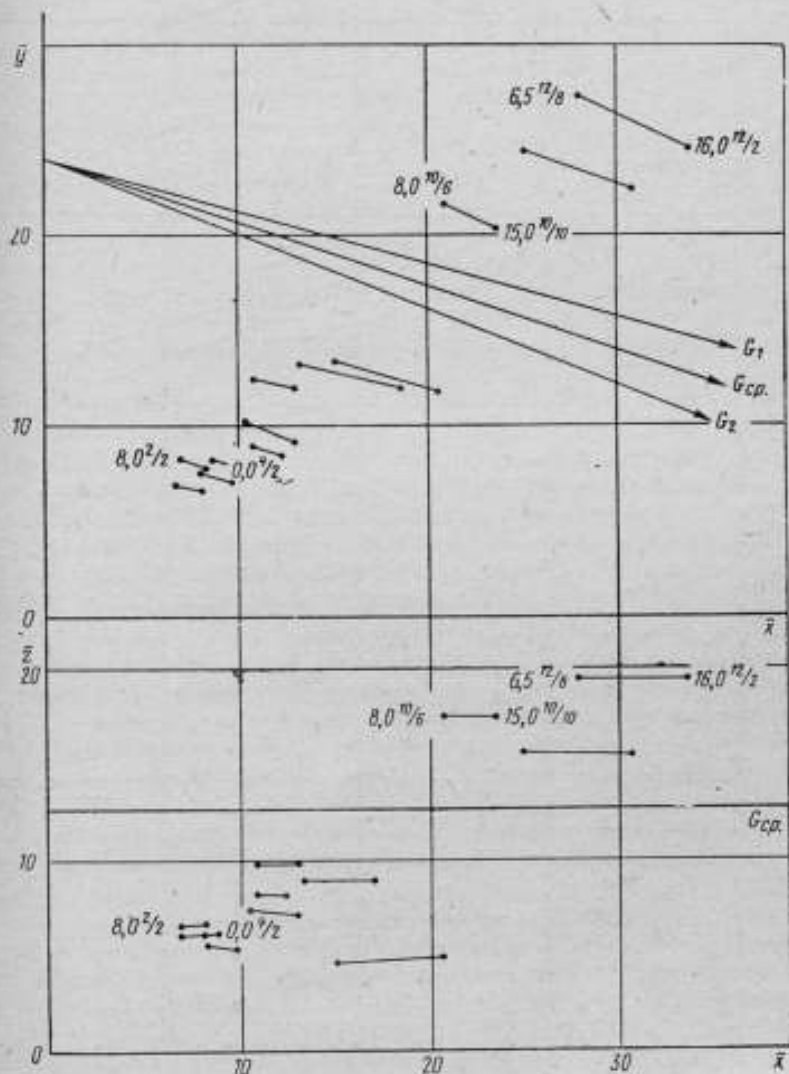


Рис. 4. Цвета, не различимые дейтеранопами при источнике А.



ния двумя глазами в широком поле зрения и тем самым приблизить условия измерения порогов к условиям эксплуатации таблиц на практике. Для выполнения этой части работы по рецептурам, прилагаемым к колориметрическому атласу, были изготовлены окрашенные диски всех не различных дихроматами цве-

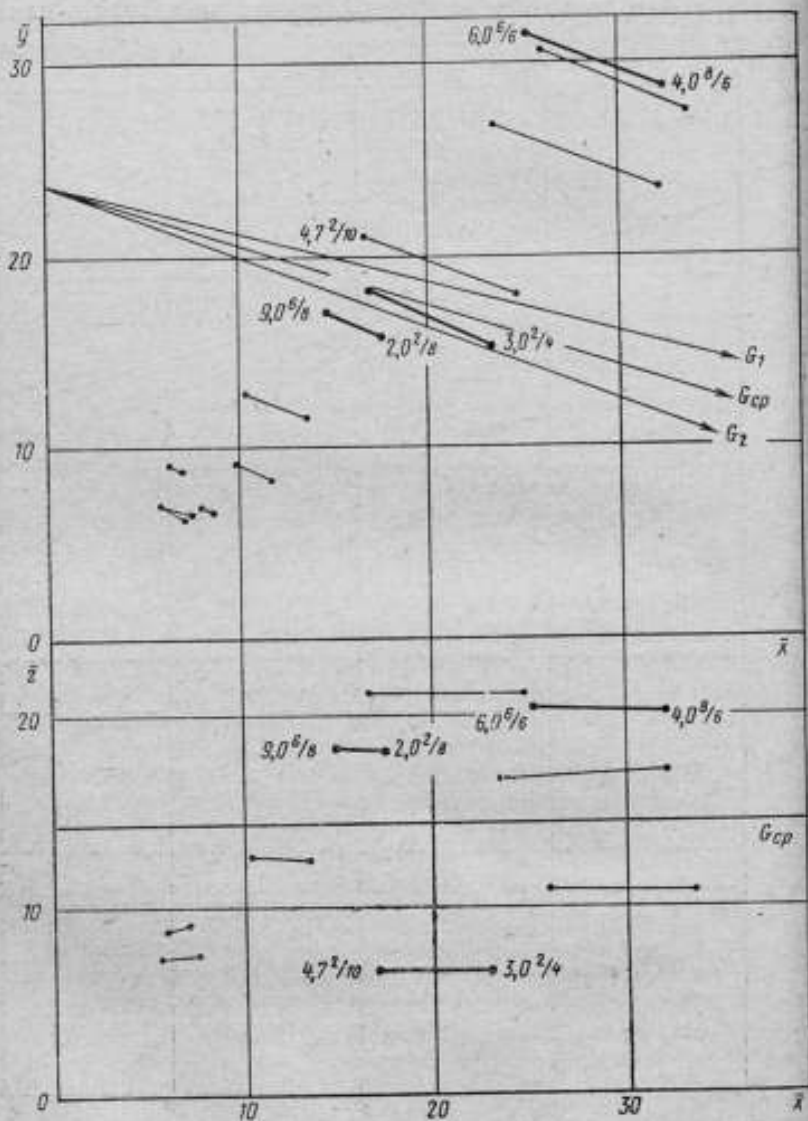


Рис. 5. Цвета, не различимые дейтранопами при источнике С.

тов. Каждый цвет был представлен двумя дисками — большим и малым.

Пары не различных дихроматами цветов сочетались на вертушке (рис. 6), т. е. цвет центрального круга (измеряемый цвет) был представлен той же парой дисков, что и цвет сравнения на периферическом кольце вертушки (составленный из больших дисков).

Для дихромата вращающиеся диски в любом сочетании всегда выглядели как одноцветное сплошное поле. Для наблюдателя с нормальным цветным зрением цвета внутреннего круга и внешнего кольца, естественно, представлялись различными, если соотношение углов раскрытия в одной паре дисков отличалось от соотношения в другой паре дисков и если это соотношение превышало цветовой порог.

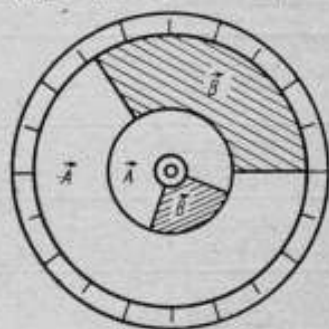


Рис. 6. Схема вертушки Максвелла.

Цель эксперимента — определение числа ступеней перехода от одного цвета  $\bar{A}$  к другому цвету  $\bar{B}$  путем последовательного добавления второго цвета  $\bar{B}$  к первому цвету (см. рис. 6) до появления между полями едва заметного различия. Угол раскрытия по шкале вертушки, соответствующий этому моменту, регистрировался и затем производилась компенсация раскрытия путем введения такого же количества второго цвета в другое поле. Эти измерения повторялись до тех пор, пока не был закрыт весь диск измеряемого цвета  $\bar{A}$  вторым цветом  $\bar{B}$ .

В результате по зафиксированным углам открытия можно выразить пороги в координатах цвета, а число последовательных дискретных переходов считать числом порогов цветоразличения наблюдателя с нормальным цветным зрением. В измерении порогов участвовало пять наблюдателей; за число порогов принималось среднее значение. В табл. 1 приведены средние измеренные значения числа порогов и для сравнения даны значения, вычисленные по формуле Никкерсон и Вышецкого [10]. В табл. 3 приведены примеры вариаций числа порогов по измерениям пяти наблюдателей.

3. Оформление тестов. Тесты оформлялись в двух вариантах: в виде таблиц, подобных таблицам Штиллинга, Ишихары, Рабкина [7], с тем отличием, что распознаваемым знаком в них служила не фигура или цифра, а, как и в первом варианте таблиц ВНИИМ [6], круг Ландольта. Испытуемый должен указать направление прорези в кольце. Таблицы имеют форму квадратов и могут предъявляться в любом из четырех положений.

Точный подбор цветов исключал необходимость камуфляжа,

Цветовые пороги по данным измерений пяти наблюдателей

Пары цветов в обозначениях по атласу	Наблюдатели					Среднее
	ИНП	НМП	НИК	ИЗП	ВГМ	
13,0 10/8 12,0 6/8	6	3	4	6	5	5
2,0 8/8 3,0 10/12	8	7	7	8	10	8
2,0 8/8 9,0 6/8	16	10	13	14	17	14
3,0 2/4 4,7 2/10	36	31	29	30	34	32
8,0 2/2 2,0 4/2	62	59	53	60	65	60

который применяется в таблицах Ишихара и Рабкина для огрубления порогов цветоразличения.

Пигменты были нанесены на глянцевую сторону односторонне матированной ацетобутиратцеллюлозной пленки. Фронтальной стороной теста служила матовая сторона пленки.

Таблицы, представленные в виде набора отдельных карт, в которых опознаваемой фигурой служит кольцо Ландольта, обладают явным преимуществом перед таблицами, изданными типографским способом в виде книги с изображением цифр и геометрических фигур, так как в них исключена возможность заучивания и они отличаются большой прочностью.

Во втором варианте таблицы представлены в виде планшетов из серой бумаги с двумя квадратными прорезями, расположенными на близком расстоянии друг от друга. Через прорези наблюдатель может видеть пары неразличимых цветов, смонтированные на дисках, скрытых за планшетами. Экспериментатор может поворачивать диски и, помещая перед прорезями на планшетах любые пары цветов, предъявлять их испытуемому.

### Заключение

Пары цветов, не различимых дихроматами, подобраны с погрешностью, не превышающей относительной погрешности 1—3% определения направления осей физиологической системы на визуальном колориметре, и лишь в случае тританопических пар при источнике С погрешность достигает 6%.

Пары цветов, не различимых дихроматами, всегда укладываются в пределах естественных вариаций направлений осей  $R_0$

и  $\bar{G}_0$  (см. рис. 2—5) и это позволяет считать таблицы, составленные из этих цветов, обеспечивающими четкий диагноз.

Более точный подбор тританопических пар не целесообразен ввиду того, что область неопределенности направления оси  $\bar{B}_0$  [9] существенно превышает пределы вариаций 6%.

Хотя результаты измерения пятью наблюдателями числа порогов между дихроматическими парами (см. табл. 3) хорошо согласуются между собой, однако числа экспериментально определенных порогов не совпадают с числами, полученными по формулам. Это свидетельствует об ограниченной применимости современных равноконтрастных систем для решения такого рода задач. В таблицах отсутствуют тесты для обнаружения форм аномалии. Подобные формы цветного зрения еще недостаточно хорошо исследованы физическими методами. Так, до сих пор не известен характер искажения кривых спектральной чувствительности [7] у аномалов типа А, В и С, обнаруженных Е. Б. Рабкиным, что является серьезным препятствием при разработке методики подбора цветов в соответствующих таблицах. Кроме того, есть основания полагать, что пигменты, которые всегда обладают широкими полосами отражения, вообще могут оказаться непригодными для обнаружения аномалии и тем более ее тонких градаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. König A. Gesammelte abhandlungen. Leipzig, 1903.
2. Нюберг Н. Д., Юстова Е. Н. Исследование цветного зрения дихроматов. Тр. ГОИ, т. XXIV, вып. 143, 1955.
3. Юстова Е. Н. Спектральная чувствительность приемников глаза. ДАН, т. 74, 1950, 1069—1072.
4. Раутман Г. Н. К вопросу с классификации форм цветного зрения. ДАН, т. 81, № 5, 815, 1951.
5. Раутман Г. Н. Новый аномалоскоп. ДАН, т. 73, № 1, 99, 1950.
6. Юстова Е. Н. Новые таблицы для испытания цветного зрения. Тр. ВНИИМ, вып. 56 (116), 1961.
7. Юстова Е. Н. Колориметрический анализ тестов Ишихара и полихроматических таблиц Рабкина. «Проблемы физиологической оптики», т. 12, 1958, 511—532.
8. Юстова Е. Н. Атлас цветов ВНИИМ. «Измерительная техника», 1967, № 1.
9. Нюберг Н. Д. Определение положения в цветовом пространстве треугольника основного синего цвета. ДАН, т. 65, № 2, 159, № 163, 1949.
10. Wyszecki G. Recent Developments on Color—Difference Evaluation, National Research Council of Canada, Division of Physics, Ottawa, 1971.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ШКАЛЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЕЛИЗНЫ ЦЕЛЛУЛОИДА

В вопросе оценки белизны не существует удобных для практического применения методов. Многие способы измерения белизны — графическое представление результатов или эмпирические формулы — сложны для использования на производстве [1, 2, 3]. В данной работе рассмотрен один из приемов оценки белизны целлулоида с помощью специально изготовленной шкалы слабоокрашенных образцов.

### Определение области цветового охвата целлулоида

Метод измерения малых цветовых различий, используемый при измерении белизны, заключается в том, что исследуемый образец сравнивается с близким к нему по цвету эталоном в одних и тех же условиях освещения, и прибор регистрирует отношение координат цвета образца к координатам цвета эталона. На фотоэлектрических компараторах цвета эти отношения могут определяться с погрешностью порядка 0,1—0,5%, которая не превышает порога контрастной чувствительности глаза к цветовым различиям.

Разработанные научно-исследовательскими институтами компараторы цвета — электронный ЭКЦ-1 [4] и фотоэлектрический с шаровым осветителем ФКЦ-Ш [5] прошли государственные испытания во ВНИИМ и рекомендованы к серийному выпуску. На рис. 1, а, б показаны принципиальные схемы этих приборов.

Оба компаратора имеют двухлучевые симметричные оптические системы. В компараторе ФКЦ-Ш применена дифференциальная схема двух фотоэлементов с внешним фотоэффектом и нулевой метод компенсации световых потоков при помощи диафрагм типа «кошачий глаз», снабженных измерительными шкалами.



В компараторе ЭКЦ-1 образец и эталон освещаются попеременно модулированным светом, исходящим из одного и того же источника, и отраженный свет, проинтегрированный фотометрической сферой, падает на фотоумножитель. Если интенсивности пучков света, отраженных от образца и эталона, различны, то возникает пульсирующая освещенность и переменный ток в сети фотоумножителя, который регистрируется микроамперметром.

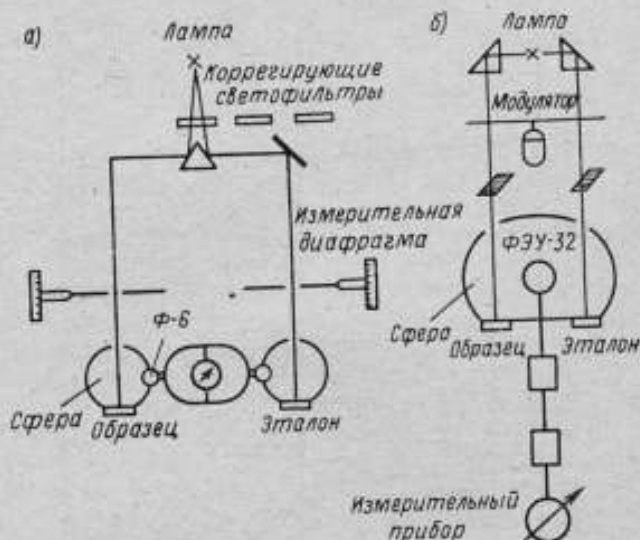


Рис. 1. Схема устройства компараторов цвета.

На обоих приборах можно производить измерения малых цветовых различий при освещении образцов источниками А и С, а в компараторе ЭКЦ-1 — и при источнике В (ГОСТ 7721-61).

Для измерения белизны целлулоидов был выбран компаратор цвета ЭКЦ-1, так как световое пятно на измеряемом образце в этом приборе в 3—4 раза больше светового пятна в компараторе ФКЦ-Ш, что существенно для измерения образцов с неоднородной по цвету поверхностью или образцов, имеющих вкрапления. На компараторе ЭКЦ-1 при источнике С (ГОСТ 7721-61) было исследовано около 100 образцов белого целлулоида из партий различного выпуска относительно образца белой поверхности из молочного стекла сорта МС-14. Результаты этих измерений представлены графически на рис. 2. На этой диаграмме по трем вертикальным осям откладываются непосредственно отсчеты по прибору:

$$m_x = \frac{\bar{x}_0}{x_s}, \quad m_y = \frac{\bar{y}_0}{y_s}, \quad m_z = \frac{\bar{z}_0}{z_s}$$

где  $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$  — координаты цвета образца;  $\bar{x}_s, \bar{y}_s, \bar{z}_s$  — координаты цвета эталона. В данных относительных измерениях координаты цвета эталона были приняты равными единице.

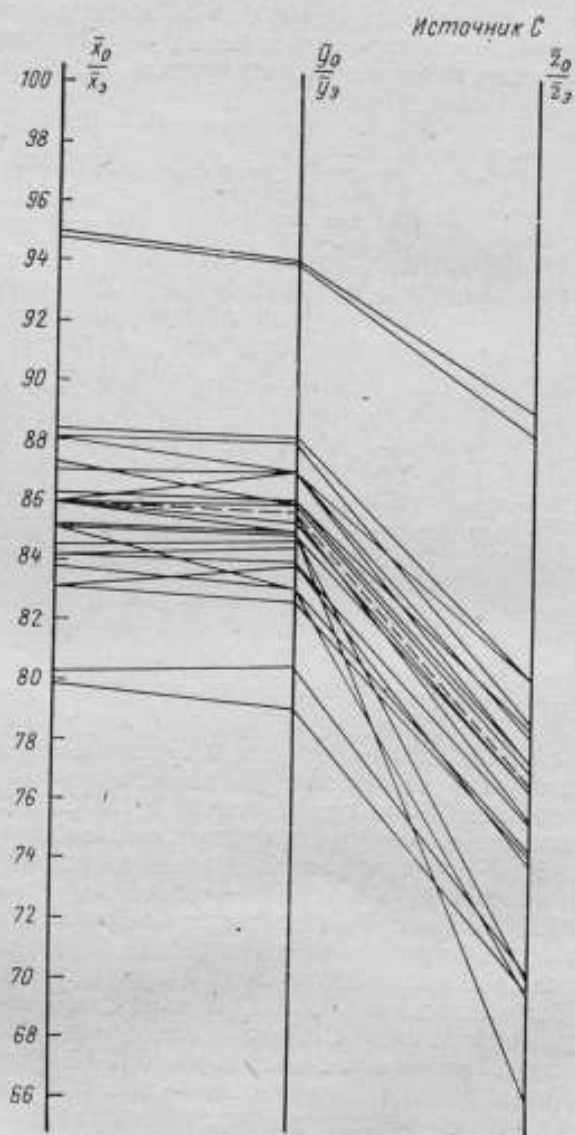


Рис. 2. Результаты измерения 100 образцов белого целлюлоза на ЭКЦ-1.

Как видно, цвета основной группы целлулоидов лежат в пределах: 0,830—0,884 по координате  $\bar{x}$ ; 0,828—0,882 по координате  $y$ ; 0,740—0,800 по координате  $z$ .

### Выбор наиболее характерных цветов целлулоида и возможные способы их воспроизведения

Внутри основной группы целлулоидов можно выделить семь наиболее характерных групп образцов, различных по цвету. Значение  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  этих образцов вынесены на диаграмму рис. 3

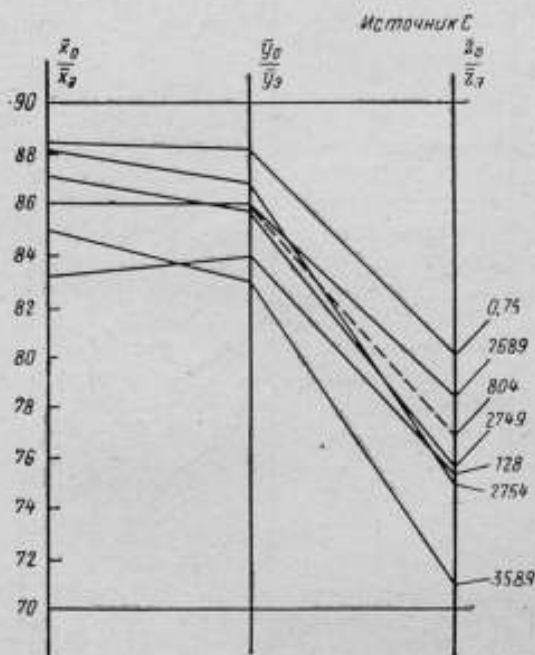


Рис. 3. Наиболее характерные образцы белого целлулоида.

Эти образцы были измерены также и на спектрофотометре СФ-10. Для них были рассчитаны координаты цвета и цветности для среднего стандартного наблюдателя в системе XYZ, приведенные в табл. 1. Из табл. 1 следует, что цвет целлулоида может быть голубоватым, голубовато-зеленым, зеленовато-желтым, желтоватым и слегка розовато-пурпурным. Таким образом, получается, что контроль цвета целлулоида необходимо производить по трем координатам в том случае, если требуется точное совпадение по цвету при сортировке образцов.

Чтобы образцы целлюлоида могли служить «эталоном» для контроля текущей продукции (на Охтинском Химкомбинате), необходимо было проверить, обладает ли целлюлоид достаточной светостойкостью и однородностью поверхности. С этой целью были выполнены следующие опыты: 8 образцов целлюлоида выставлялись на солнце в апреле месяце, причем одна поло-

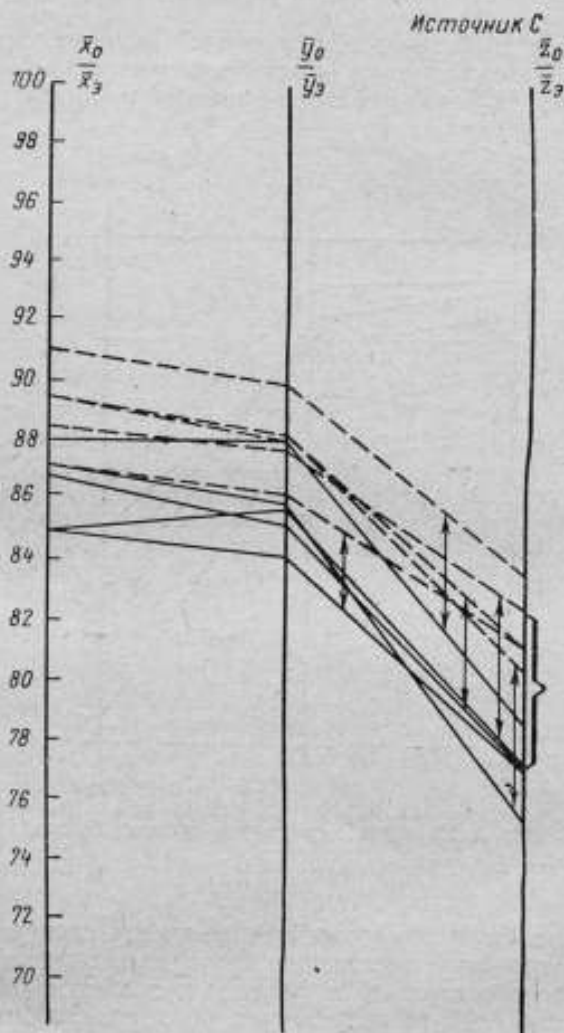


Рис. 4. Результаты измерения облученных и необлученных солнцем участков образцов целлюлоида.

— образцы целлюлоида до облучения солнцем;  
 - - - образцы целлюлоида после облучения солнцем.

Таблица 1

Абсолютные координаты цвета наиболее характерных образцов целлулоида при источнике С.

Образцы целлулоида	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$x$	$y$
2749	79,5	82,3	80,1	0,328	0,340
3539	77,8	80,8	77,9	0,329	0,342
804	79,0	82,3	82,3	0,324	0,338
0,75	80,4	83,7	83,2	0,325	0,338
128	77,8	81,2	80,3	0,325	0,339
2754	81,0	83,9	81,9	0,328	0,340
2689	80,0	83,5	83,0	0,324	0,339

вина образца облучалась, а вторая — закрывалась черной бумагой. По истечении месяца облученные и затененные участки (см. рис. 4) были измерены на компараторе цвета. Как следует из рисунков, изменение в координатах цвета достигает больших значений: для координаты  $\bar{x}$  — порядка 3%, для координаты  $\bar{y}$  — 2%, для координаты  $\bar{z}$  — порядка 5%. Все образцы целлулоида после облучения стали светлее и приобрели розовый оттенок. Таким образом, цвет целлулоида нестабилен и образцы из него не могут быть использованы в качестве эталонов.

Для выяснения степени однородности цвета целлулоида несколько образцов было измерено в трех точках поверхности. Результаты измерения в разных точках различаются в среднем при коррегирующем светофильтре  $\bar{x}$  — на величину порядка 0,003, при светофильтре  $\bar{y}$  — на величину порядка 0,002, при светофильтре  $\bar{z}$  — на 0,004, т. е. составляет 1—2 порога цветоразличения около белого цвета.

Так как целлулоид не обладает стабильностью цвета и однородностью поверхности, среди известных светопрочных белых материалов [6] (эмалей, фаянсов, фарфоров) был выбран материал, который воспроизводит наиболее характерные цвета целлулоида. Образцы эмалей и фаянса, подобранные визуалью по признаку наибольшего сходства, были также измерены на компараторе цвета. Тождественность характеристик образцов фаянса и фарфора с образцами целлулоидов установить не удалось, и поэтому пришлось выбрать наиболее близкие по цвету образцы.

#### Установление допуска на белизну целлулоида

Из образцов фаянса был выбран образец, координаты цвета которого больше координат цвета самого светлого целлулоида основной группы. Далее из эмалей (среди фаянсов такого об-



разца не оказалось) выбрали образец, координаты цвета которого меньше координат цвета самого темного образца основной группы целлулоидов. Таким образом, эти два образца осуществляют верхний и нижний пределы измерения цвета целлулоидов основной группы, т. е. вещественно воспроизводят допуск на белый целлулоид, выпускаемый Охтинским Химкомбинатом. При измерениях на компараторах цвета они могут служить стабиль-

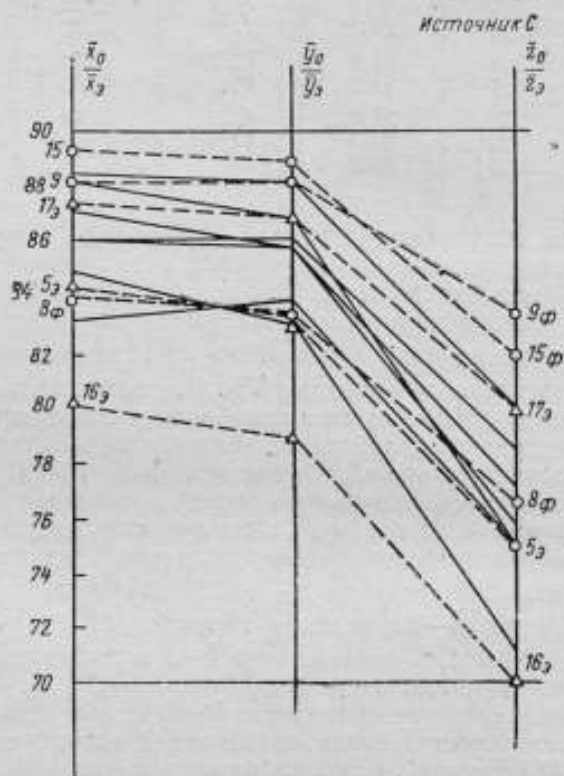


Рис. 5. Результаты измерения стандартных образцов, воспроизводящих цвет целлулоида.

— образцы целлулоида; — О — образцы фаянса; — Δ — образцы эмали.

ными эталонами. Верхний и нижний пределы измерения отмечены на рис. 5 пунктирными линиями. На этом же рисунке наряду с характерными образцами целлулоидов представлены несколько образцов фаянса и эмали.

Таким образом, окончательные пределы измерений (допуск) для белого целлулоида можно выразить следующими цифрами: 0,800—0,890— для координаты  $x$ ; 0,790—0,890— для координаты  $y$ ; 0,700—0,830— для координаты  $z$ .

Для дифференцированной разбраковки целлулоида основной группы по сортам можно предложить три образца эмалей и фаянсов, цветовые характеристики которых лежат внутри вышеуказанных допусков.

В табл. 2 приведены координаты цвета стабильных белых образцов (эмалей, фарфоров) в системе XYZ для источника С (ГОСТ 7721—61). Пользуясь данными табл. 2 и результатами измерений на компараторе цвета, выполненными относительно этих образцов, можно определять координаты цвета целлулоида в системе XYZ МОК 1931 г.

Таблица 2

Абсолютные значения координат цвета образцов фаянса и эмалей при источнике С

Образец	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$x$	$y$
15 ф.	81,4	84,9	84,4	0,324	0,339
8 ф.	74,4	77,8	76,3	0,326	0,340
16 э.	72,3	75,5	71,6	0,330	0,344
17 э.	80,7	84,6	85,1	0,322	0,338
9 ф.	79,8	83,7	85,2	0,321	0,337
5 э.	76,6	80,2	77,9	0,326	0,342

### Выводы

Установлены границы измерения цвета белого целлулоида. Наиболее характерные образцы (семь образцов) аттестованы спектрофотометрическими и колориметрическими характеристиками в международной системе XYZ.

При отсутствии измерительных приборов (компараторов цвета) набор аттестованных образцов целлулоида можно использовать в качестве контрольно-измерительной шкалы для визуальной разработки целлулоида по сортам. Однако вследствие выцветания целлулоида шкалу нельзя подвергать длительному солнечному облучению и следует систематически проверять, не реже двух раз в год.

Шкала целлулоидов воспроизведена с некоторой степенью приближения в эмалевых, фарфоровых и фаянсовых образцах (шесть образцов), которые могут служить в качестве стандартных образцов при работе с компараторами цвета. Два образца этой шкалы, осуществляющих верхний и нижний пределы измерения цвета целлулоидов, вещественно воспроизводят допуск на цвета целлулоидов. Образцы аттестованы спектрофотометрическими и колориметрическими характеристиками, которые следует проверять во ВНИИМ не чаще одного раза в три года.

Для измерения цвета целлулоида рекомендуются компараторы цвета ЭКЦ-1 и ФКЦ-Ш. Наличие аттестованной стабильной шкалы позволит выражать цвета целлулоидов, измеренных на компараторе, в международной колориметрической системе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Richter M. Die Farbe. t. 13, 1964, Н. 1—3, S. 89—133.
2. Mac Adam. Specification of small chromaticity differences. JOSA, 33, 1943, p. 18—26.
3. Davidson H. R. и Hanlow J. J. Use of charts for rapid calculation of color differences. JOSA, 45, 1955, № 8, p. 617—620.
4. Рымов А. И., Шкловер Д. А. Фотоэлектрический компаратор цвета. «Светотехника», 1961, № 10.
5. Лукин Н. И., Петров Э. С. Фотоэлектрический компаратор цвета. «Светотехника», 1965, № 9.
6. Матвеев И. К., Басин И. В. Определение белзны фарфора и фаянса фотоэлектрическим методом, Тр. ГЛКИ, 1950, Сб. № 23.

Поступила в редакцию  
20/XI 1971 г.

МЕТОД КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
КАЧЕСТВА КРАСИТЕЛЕЙ

К основным аспектам использования колориметрии следует прежде всего отнести контроль качества продукции и расширение цветовой гаммы посредством использования современных физических методов расчета рецептур смесового крашения.

Высокие требования, предъявляемые к качеству отечественных красителей, вызывают необходимость замены субъективных методов оценки объективными, а также стандартизацию наиболее важных спектральных и колориметрических характеристик красителей. В настоящее время стандартизованы спектры поглощения растворов прямых и кислотных красителей, и оценка концентрации по отношению к типовым партиям выполняется спектрофотометрическим методом (ГОСТ 6965—54). Однако оценка цветовых отклонений от типовой партии красителя проводится визуально и субъективный подход естественно приводит к снижению точности контроля качества красителей. Очевидна необходимость стандартизации цветовых характеристик красителей при фиксированном источнике света, например, координат цвета  $X$   $Y$   $Z$  по МКО, при этом следует указывать допустимые отклонения оттенка испытуемой партии красителя от типовой. В этом случае возникает трудность, которая заключается в следующем.

Ассортимент красителей состоит из большого числа наименований. Так, например, число кислотных красителей для шерсти составляет свыше 100. Использование для измерения цветовых различий любой неравноконтрастной колориметрической системы, в том числе и стандартизованной в СССР системы  $X$   $Y$   $Z$  МКО (ГОСТ 13088—67), вызывает необходимость в разработке допусков для каждого красителя и каждого оттенка. Это составит большой объем работы, и поэтому практически введение цветовых допусков не реально.

Возможен и другой путь — применение графического или аналитического метода для перехода в равноконтрастное прост-

ранство, в котором цветовые различия измеряются единой мерой, не зависящей от цвета красителя [1—2].

Как показано в работе [3], лучшую корреляцию с визуальной оценкой дает использование колориметрической системы Мак-Адама. Именно эта система была использована автором при разработке цветовых допусков для контроля типовых партий красителей.

Цветовые характеристики красителя количественно могут быть описаны координатами цвета  $X Y Z$  МКО или же координатами цветности  $x, y, z$ , которые позво-

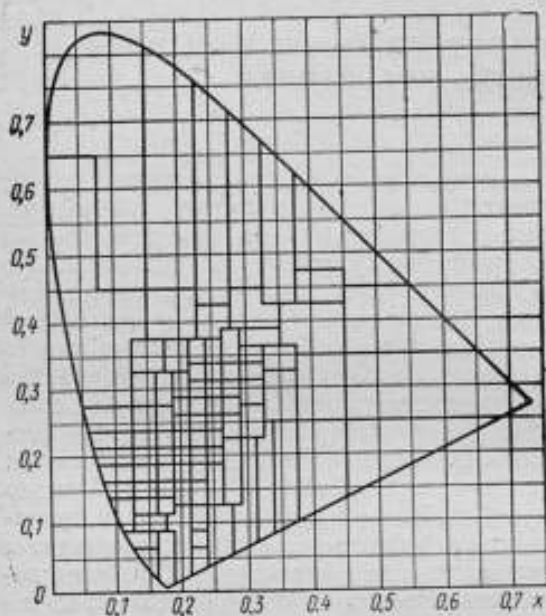


Рис. 1.

Известно, что если взять два синих красителя, цветовые различия которых при визуальной оценке соответствуют различиям двух зеленых красителей, то соответствующие отрезки на диаграмме цветности МКО будут различаться в несколько раз. Иными словами, если в качестве допустимого отклонения принять пороговую чувствительность глаза, то допуски на диаграмме цветности имели бы вид эллипсов Мак — Адама. Разбив поле цветового треугольника на части и преобразовав эллипс в окружность постоянного радиуса, величину этого радиуса в дальнейшем можно использовать в качестве цветовых различий, единых для всего цветового поля.

Именно такая процедура была использована в графическом методе Симона и Гудвина. Цветовой треугольник был разбит на 89 частей (рис. 1), и для каждой из них было сделано преобразование эллипсов Мак — Адама в окружности равных радиусов на специально приготовленных картах. 89 таких карт однородной цветности, выполненные Симоном и Гудвиным, опубли-

натыми цветности  $x, y, z$ , которые позволяют изобразить каждый краситель в виде точки на диаграмме цветности МКО, а цветовые различия двух сравниваемых красителей отрезком прямой, соединяющей соответствующие точки.

Иными словами, если в качестве допустимого отклонения принять пороговую чувствительность глаза, то допуски на диаграмме цветности имели бы вид эллипсов Мак — Адама. Разбив поле цветового треугольника на части и преобразовав эллипс в окружность постоянного радиуса, величину этого радиуса в дальнейшем можно использовать в качестве цветовых различий, единых для всего цветового поля.



кованы фирмой «Юнион Карбид Корпорейшн». Одна из них приведена на рис. 2. На каждой карте по осям отложены координаты цветности  $x$  и  $y$ . Цена деления составляет 0,001 единицы цветности. На карту наносятся точки, соответствующие координатам цветности сравниваемых красителей. Измеряя расстояние между этими точками, легко получить не скорректированную по яркости величину цветового различия  $\Delta C$  (длина отрезка 0,5 дюйма соответствует одной единице Мак — Адама).

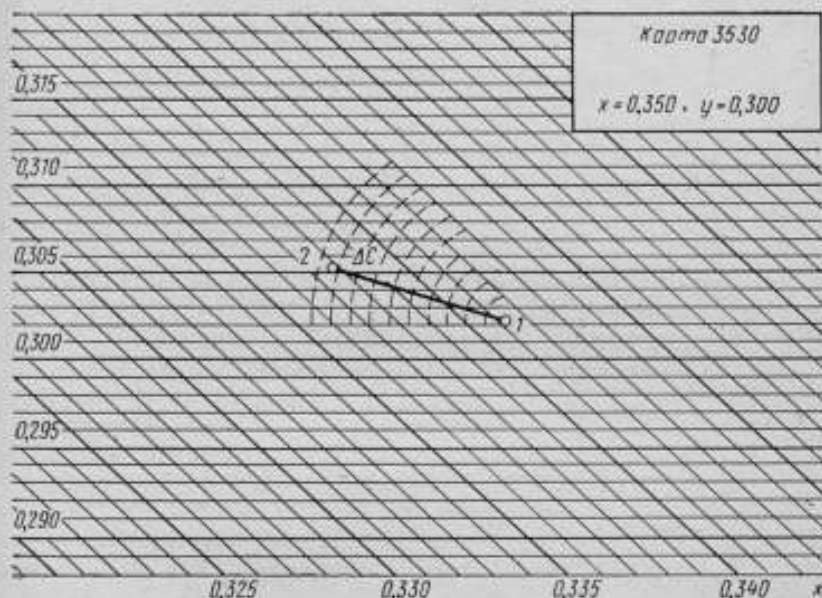


Рис. 2.

Другие 13 карт расчета цветовых различий дают возможность вводить поправку в измеренные цветовые различия с учетом относительной яркости и позволяют выразить общее цветовое различие  $\Delta A$ , а также различие по светлоте  $\Delta L$  и по цветности  $\Delta C$  в соответствии с визуально воспринимаемыми различиями (рис. 3).

С использованием равноконтрастного пространства для измерения цветовых различий сравниваемых красителей стало возможным введение единых допусков для всего ассортимента красителей и выражение их в единицах Мак — Адама\*.

В настоящее время в колористической практике при визуальном сравнении испытуемой партии красителя с типовой для вы-

\* Одна единица НБС (Национальное бюро стандартов США) равна примерно 5 единицам Мак-Адама.

ражения степени соответствия цветовых характеристик красителей применяется пятибалльная шкала оценок:

Визуальная оценка	Баллы
Близки . . . . .	1
Незначительно отличаются . . . . .	2
Несколько отличаются . . . . .	3
Синее, краснее, зеленее и т. д. . . . .	4
Значительно отличаются . . . . .	5

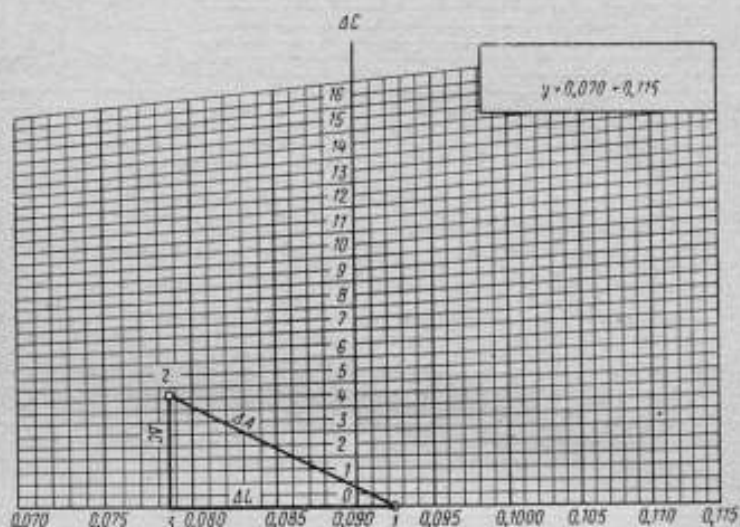


Рис. 3.

Для количественного выражения каждой ступени этой шкалы в единицах Мак — Адама необходимо сопоставить визуальную и колориметрическую оценки цветовых различий. С этой целью были приготовлены образцы алого, красного, синего и зеленого цветов, а также соответствующие серии образцов, подцветенных желтым, голубым, зеленым, красным и синим красителями. Образцы каждой серии имели цветовые различия по отношению к исходным образцам, монотонно увеличивающиеся от нуля до предельной величины, укладываемой в пятибалльную шкалу оценок. Цветовые различия образцов каждой серии оценивались визуально по пятибалльной шкале оценок и колориметрически — по описанному выше методу Симона — Гудвина. Координаты цвета измерены с точностью до  $\pm 0,0005$ .

Усредненные результаты оценки 20 колористов приведены на рис. 4. Как видно, независимо от цвета нюансирующих красителей все точки ложатся на подобные кривые. Усредненная кривая

характеризует связь пятибалльной шкалы с единицами Мак-Адама и позволяет колориметрически оценить допустимые цветовые отклонения сравниваемых красителей.

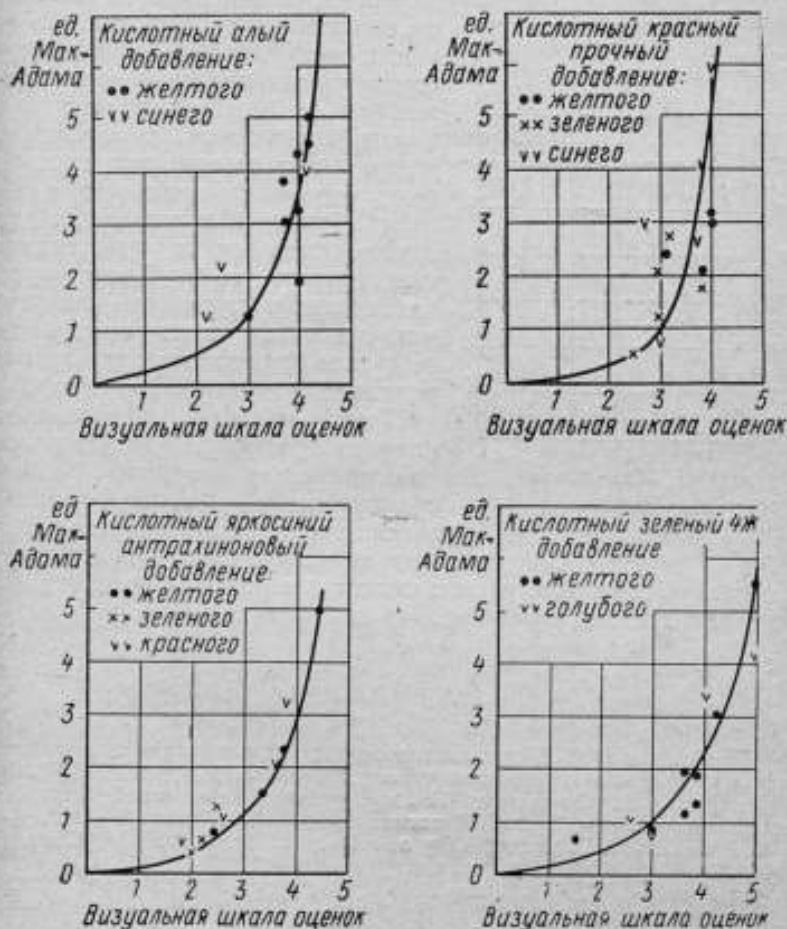


Рис. 4.

Наряду с использованием графического метода оценка цветовых различий может быть произведена аналитическими методами. Например, применяя  $u, v$ -систему [4], также основанную на данных Мак—Адама, в качестве меры цветовых различий можно воспользоваться величиной

$M = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 + (\Delta w)^2}$ , линейно связанной с оценкой цветовых различий в порогах Мак—Адама (рис. 5).

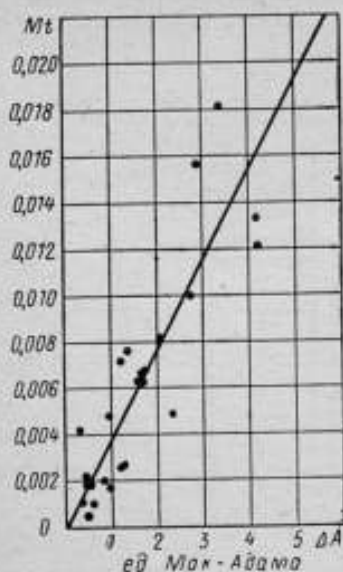


Рис. 5.

красителей типовой партии и единые допуски для всего ассортимента красителей.

При испытании красителя по отношению к типовой партии в первую очередь для колориметрических измерений необходимы подогнанные по концентрации образцы. С этой целью по ГОСТ 6965—54 спектрофотометрически определяется относительная концентрация испытуемой партии красителя. На основе этих данных приготавливаются подогнанные по концентрации образцы, окрашенные типовой и испытуемой партиями красителя в интенсивности стандартного тона. Затем проводятся колориметрические измерения и по описанному выше методу количественно определяются цветовые различия сравниваемых партий.

Таким образом, использование равноконтрастного пространства для измерения цветовых различий сравниваемых красителей позволяет ввести контроль соответствия цветовых характеристик разных партий

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров В. Г. Применение колориметрии в текстильной промышленности и физические методы воспроизведения цвета. Изд. ЦНИИТЭИ, 1968.
2. Simon F., Goodwin W. Rapid graphical computation of small colour differences. Amer. Dyestuff Reporter. v. 47, № 4, 1958, p. 105—112.
3. Robinson D. Acceptability of colour Matches J. Oil. Col. Chem. Ass. 82, 15, 1969.
4. Nimeroff J. Colorimetry N. B. S. Monograph 104, 24 pages, 1968.

Поступила в редакцию  
20/IX 1971 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КООРДИНАТ ЦВЕТА

Расчет координат цвета по спектрофотометрическим данным, нанесенным на стандартный бланк спектрофотометра, путем численного интегрирования, связан с трудоемкими и громоздкими вычислениями. Поэтому исследование возможности автоматизации цветовых расчетов и создание высокоточного и быстродействующего автоматического устройства, анализ и расчет спектрофотометрических данных с целью определения координат цвета или других коэффициентов, характеризующих его особенности, следует считать весьма актуальной проблемой колориметрии и развития отечественного приборостроения.

Как в СССР, так и за рубежом неоднократно делались попытки ускорить колориметрические расчеты путем разработки различных методов и приспособлений. Так, А. Харди применил в колориметрии прием расчета координат цвета, введенный впервые П. Л. Чебышевым, получивший название «метод избранных ординат» [1, 2]; Р. Лютер и З. Реш предложили метод трансформации длин волн (графический метод расчета) [3] и наконец японская фирма «Тошиба» в спектральном колориметре типа SC-1 [4] использовала новую трансформированную шкалу длин волн. Наряду с этими методами разрабатывались различные системы и приспособления, основанные на принципе избранных ординат (калькуляторы Сванка и Меллона, Сириса), или на непрерывном интегрировании (интеграторы Ван-ден-Акера и Харди).

За последние годы для расчета координат цвета применяют вычислительные системы, например, анализатор цвета аналого-цифрового типа французской фирмы «Trilac». Подобная система разработана в США фирмой «Instrument Development Laboratories». Японская фирма «Тошиба» предложила вычислительную систему СС-1 дискретного действия. Однако несмотря на



большой интерес к вопросам автоматизации колориметрических расчетов до сих пор отсутствуют практически пригодные методы и устройства, отвечающие современным требованиям точности, надежности и быстродействия, а также методы и устройства, с помощью которых можно было бы по спектрофотометрическим данным быстро с высокой степенью точности вычислять координаты цвета.

Известно, что координаты цвета исследуемого объекта при заданном стандартном источнике света А, В, С или Е [5] определяются соотношениями [1]:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \int_{380}^{760} \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) P(\lambda) d\lambda; \\ \bar{y} &= \int_{380}^{760} \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) P(\lambda) d\lambda; \\ \bar{z} &= \int_{380}^{760} \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) P(\lambda) d\lambda,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  — функции сложения (кривые сложения) цветов;  $\rho(\lambda)$  — коэффициент отражения;  $P(\lambda)$  — спектральная интенсивность излучения источника.

Координаты цветности определяются отношением каждой из координат цвета к их сумме, т. е.

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}.$$

Координата  $z$  обычно опускается как зависимая, поскольку  $x + y + z = 1$ .

С целью облегчить эти расчеты по спектрофотометрическим данным применяется метод преобразования шкалы длин волн и избранных ординат. С точки зрения автоматизации расчета координат цвета при сохранении необходимой точности предпочтителен метод избранных ординат. Расчет интегралов (1) этим методом сводится к суммированию ординат кривой  $\rho(\lambda)$  при некоторых определенных значениях длин волн  $\lambda$  и умножению полученной суммы на постоянный для данного источника света коэффициент.

Выражения (1) для этого случая примут вид:

$$\bar{x} = k_1 \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_{ixp}); \quad \bar{y} = k_2 \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_{iyр}); \quad \bar{z} = k_3 \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_{izp}), \quad (2)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  — пропорциональны координатам цвета источников света;  $\lambda_{ixp}$ ,  $\lambda_{iyр}$ ,  $\lambda_{izp}$  — значения избранных длин волн.

Существенный недостаток метода избранных ординат, заключающийся в значительном неравномерном расположении из-

бранных ординат по оси длин волн, устраняется в описываемом интеграторе цвета с применением переменного коэффициента  $k_j$  с ограничением области вариации до восьми, т. е.

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \sum_{j=1}^n k_j \sum_{i=1}^{n_{kj}} \rho(\lambda_{ixp}^{kj}); \\ \bar{y} &= \sum_{j=1}^n k_j \sum_{i=1}^{n_{kj}} \rho(\lambda_{iyp}^{kj}); \\ \bar{z} &= \sum_{j=1}^n k_j \sum_{i=1}^{n_{kj}} \rho(\lambda_{izp}^{kj}),\end{aligned}\quad (3)$$

где  $k_j$  — выбраны равными  $1; \frac{1}{2}; \frac{1}{4}; \frac{1}{8}; \frac{1}{16}; \frac{1}{32}; \frac{1}{64}; \frac{1}{128}$ ;  $n_{kj}$  — количества избранных ординат, соответствующих  $k_j$ .

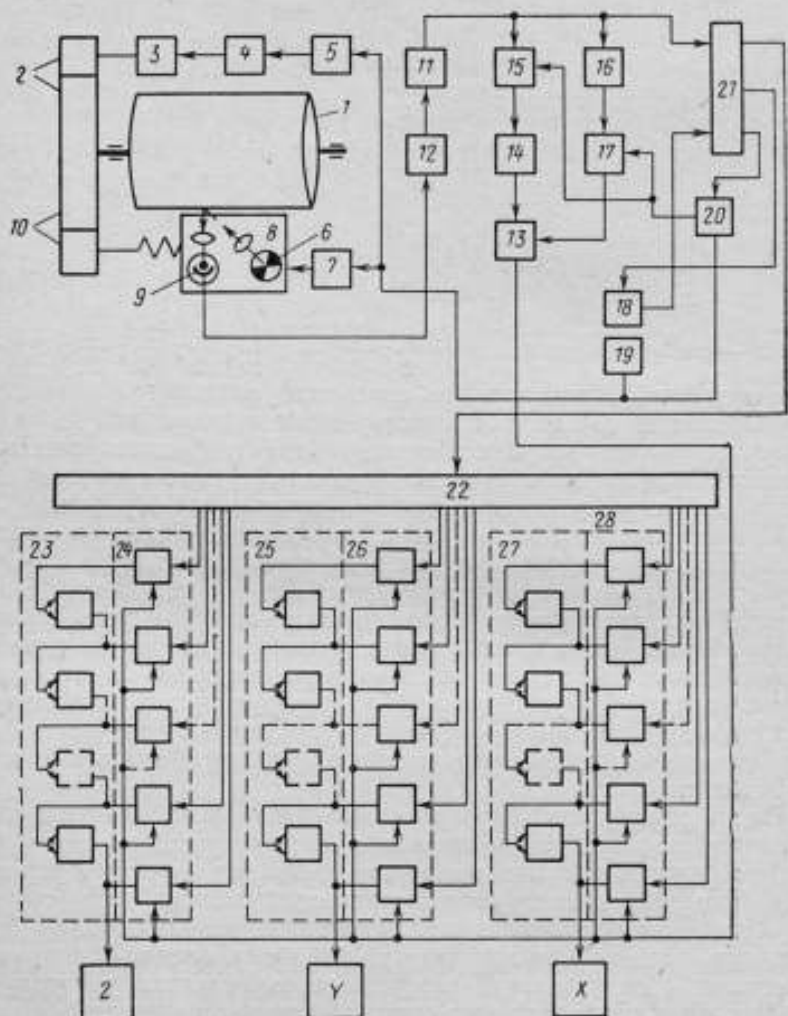
Выражения (3) являются алгоритмом прибора для автоматического расчета координат цвета по спектрофотометрическим данным. Решения их с помощью функциональной схемы, представленной на рисунке, производится следующим образом.

Предназначенный для анализа стандартный бланк со спектральной кривой светопоглощения  $\rho(\lambda)$ , спектрофотометра СФ-10, укрепляется на цилиндрическом барабане 1 с помощью одной съемной шивки; барабан приводится в движение синхронным гистерезисным двигателем 3 через понижающий редуктор привода 2. Двигатель питается от генератора импульсов 19 через делитель частоты 5 и усилитель 4. Генератор импульсов используется также для питания осветителя 6 с помощью усилителя 7 и для заполнения временного интервала, пропорционального измеряемой ординате.

Вдоль образующей барабана и, следовательно, бланка с помощью ходового винта, вращаемого через редуктор передачи 10 тем же двигателем, равномерно перемещается каретка с укрепленной на ней анализирующей оптической системой. Эта система состоит из осветителя, освещающего через конденсор 8 небольшую площадку на поверхности барабана, бланка и фотоумножителя 9, на фотокатод которого через объектив, растровую диафрагму и линзу попадает световой поток, отраженный от поверхности стандартного бланка.

Таким образом, с помощью механизма развертки производится последовательный анализ оптических плотностей всех точек сканируемого изображения (кривой светопоглощения), причем напряжение на анодной нагрузке фотоумножителя изменяется в соответствии с изменением оптической плотности элементарных площадок стандартного бланка. При пересечении световым лучом кривой светопоглощения в электрической цепи фотоумно-

жителя возникает импульс фототока, который усиливается и формируется с целью дальнейшего использования усилителем 12 и триггером Шмидта 11.



Интегратор цвета.

Отформированные импульсы, получаемые при прохождении светового пятна через «нулевую линию», совпадающую с осью длин волн, через «стопроцентную линию», совпадающую с величиной максимального отражения или пропускания лучистой энергии по всему видимому спектру, через линию кривой свето-

поглощения  $\rho(\lambda)$ , а также через шливку подаются на вход схемы совпадения 15. Одновременно эти импульсы поступают на триггеры счетчика диодного дешифратора на два входа 21, с помощью которого происходит селекция импульсов.

Барабан устанавливается в таком положении, что световое пятно при вращении барабана первой пересекает шливку, второй — «стопроцентную линию», третьей — кривую светопоглощения и последней «нулевую линию». На выходе диодного дешифратора вырабатываются перепады напряжения, разнесенные по времени, длительность которых соответственно пропорциональна расстоянию от шливки до «стопроцентной линии», от «стопроцентной линии» до кривой светопоглощения  $\rho(\lambda)$  и от кривой светопоглощения до «нулевой линии».

Импульсы с первого выхода дешифратора поступают на двоичный счетчик основного многоступенчатого диодного дешифратора 22, с помощью которого отыскивают избранные ординаты, т. е. длины волн.

Передним фронтом импульса со второго выхода, соответствующего моменту прохождения светового пятна через «стопроцентную линию», запускается одновибратор 18, длительность задержки которого устанавливается равной расстоянию от «стопроцентной» до «нулевой» линии. Задним фронтом импульса с одновибратора производится сброс, т. е. установка счетчика дешифратора 21 в первоначальное положение; этим предотвращается посылка ложной информации о величине измеряемой ординаты кривой  $\rho(\lambda)$  в случае переполнения счетчика дешифратора за цикл, по причине ложных импульсов от дефектов стандартного бланка не в избранных ординатах или незаполнения из-за слияния кривой светопоглощения с «нулевой» или «стопроцентной» линией.

При каждом появлении импульса на третьем выходе, что соответствует моменту прохождения светового пятна через кривую светопоглощения  $\rho(\lambda)$ , дается разрешение на схему совпадения 20 и импульсы от генератора проходят на ключи 17 и 15. Такое соединение ключей с инвертором 16, триггером 14 и схемой 13 позволяет учитывать погрешность от толщины и наклона линии  $\rho(\lambda)$  при автоматическом сканировании.

При прохождении светового пятна через избранную ординату на выходе основного дешифратора появляется потенциал, который дает разрешение соответствующей схеме совпадения 28, 26 и 24, и импульсы с генератора 19 проходят к двоичным стечикам, собранным на триггерах 27, 25, 23, и далее к десятичным счетчикам  $X$   $Y$   $Z$ , суммируясь на них до пропадания разрешающего потенциала с выхода дешифратора 22, что будет соответствовать моменту прохождения светового пятна через «нулевую линию».

Очевидно, что количество импульсов, поступивших на счетчики, будет пропорционально сумме величин ординат анализируемой кривой  $\rho(\lambda)$  в избранных длинах волн.

Полученные суммы перемножают на соответствующие коэффициенты [см. выражение (3)] автоматически путем ввода импульсов, двоичного эквивалента измеряемой ординаты в нужные разряды, как показано на функциональной схеме (см. рисунок).

Таким образом, после прохождения световым лучом всех избранных ординат показания счетчиков будут соответствовать координатам цвета образца, рассчитанных автоматически по спектрофотометрическим данным, нанесенным на стандартный бланк.

Как показали испытания, интегратор цвета надежно считывает линии записи спектрофотометрических данных толщиной не менее 0,15 мм при минимальной контрастности линии записи 0,35. Допустимая крутизна участков записи

$$\alpha = \arccos \frac{d}{\sqrt{(H-d)^2 + d^2}} - \arcsin \frac{h+d}{\sqrt{(H-d)^2 + d^2}} \quad (4)$$

может достигать 89 град.,

где  $H$  — расстояние между нулевой и стопроцентной линиями;  $h$  — ширина линии записи спектрофотометрических данных;  $d$  — диаметр светового пятна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич М. М. Цвет и его измерение. Изд. АН СССР, 1950.
2. Чебышев П. Л. Полное собрание сочинений. Т. II, изд. АН СССР, 1946.
3. Федоров Н. Т. Современное состояние колориметрии. Гостехиздат, 1933.
4. Проспект фирмы «Тошиба». Спектральный колориметр типа SC-1.
5. ГОСТ 13088—67. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения.

Поступила в редакцию  
20/XI 1971 г.



И. С. БАЗИЛЕВСКАЯ,  
Т. А. БОЛДЫРЕВА,  
С. И. ФРЕЙВЕРТ

УДК 621.383.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕНОВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Широкое применение селеновых фотоэлементов (ФЭ) в самых разнообразных светонизмерительных приборах и устройствах обусловило усовершенствование технологии их изготовления, что в свою очередь улучшило измерительные и эксплуатационные свойства получаемых ФЭ. В результате многолетних исследований создано несколько типов селеновых ФЭ, различающихся по своим характеристикам и предназначенных соответственно для разных областей применения.

Как известно, селеновый ФЭ относится к приемникам излучения фотовольтаического типа, действие которых основано на возникновении фотоэлектродвижущей силы на  $p-n$ -переходе.

До недавнего времени в качестве верхнего светопрозрачного электрода применялись тонкие пленки металлов Au, Pt и Cr. В последние годы для этой цели получили применение тонкие полупроводниковые пленки из окиси кадмия, обладающие при одинаковой с металлическими пленками электропроводностью более высокой светопрозрачностью.

Изменяя условия образования  $p-n$ -перехода, материал и толщину верхнего электрода, а также толщину слоя селенида кадмия, можно менять в определенных пределах характеристики получаемых ФЭ.

Разработанные за последние годы измерительные селеновые ФЭ можно разделить на три типа:

I — ФЭ с верхним золотым электродом, отличающиеся от ФЭ старого типа меньшей утомляемостью, большей фото-э. д. с. и соответственно более высоким внутренним сопротивлением;

II — ФЭ с верхним электродом из окиси кадмия, преимущество которых заключается в более высокой интегральной чувствительности и лучшей влагостойкости;

III — ФЭ с повышенной чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра.

Параметры	Типы фотоэлементов				старый тип Se-CdSe-Au
	I Se-CdSe-Au	II Se-CdSe-CdO	III Se-CdSe-Pt		
Интегральная чувствительность, мкА/лм	470 400—550	750 650—900	390 380—500		460 380—530
Фото-э. д. с. при 10 эк. мВ	220 180—300	250 180—280	70 50—120		100 70—150
Утомляемость за 3 мин. % при:					
$E=0,1$ клк, $r=1$ кОм	—	—	2,2 —4,5±±0		—
$E=1,0$ клк, $r=0,1$ кОм	0,4 —0,8±±2,0	0,5 —1,5±±0,5	—		7,3 —18,0±±0
$E=10$ клк, $r=10$ кОм	2,5 ±0±±4,0	1,9 —0,5±±3,5	—		3,2 —10±±12,0

Фотоэлементы II типа (с верхним электродом из окиси кадмия) были специально разработаны для экспонометрических устройств фото- киноаппаратов.

Ниже приводятся результаты исследования ФЭ всех трех типов, проведенные на большом количестве образцов каждого типа.

Интегральная токовая чувствительность и фото-э. д. с. Интегральная чувствительность по току и фото-э. д. с. измерялись при освещенности 10 лк, создаваемой на рабочей поверхности исследуемых ФЭ лампой накаливания с цветовой температурой  $T_{\text{цв}} = 2850$  К. В табл. I приведены средние значения токовой чувствительности, фото-э. д. с. и разброс этих параметров для ФЭ всех трех типов, полученные из данных измерений более 150 образцов серийного изготовления. Как показывают данные табл. I, среднее значение токовой чувствительности ФЭ I типа (Se—CdSe—Au) практически не отличается от чувствительности ФЭ старого типа, тогда как величина фото-э. д. с. в два раза выше, чем у последних и составляет в среднем 220 мВ. Средняя интегральная чувствительность ФЭ II типа (Se—CdSe—CdO) примерно в 1,5 раза превосходит чувствительность ФЭ I типа и составляет 750 мкА/лм. Средние значения интегральной чувствительности и фото-э. д. с. ФЭ III типа (Se—CdSe—Pt) с повышенной чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра, как правило, заметно ниже значений этих параметров для ФЭ I и II типов и равны соответственно 390 мкА/лм и 70 мВ.

ФЭ всех трех типов имеют примерно одинаковый разброс по интегральной токовой чувствительности (32—38%).

Спектральное распределение чувствительности. Измерения спектральной чувствительности производились на двойном кварцевом монохроматоре Мюллера — Хильгера методом сравнения с селеновым ФЭ, спектральная чувствительность которого ранее неоднократно измерялась с помощью градуированного термоэлемента. При измерениях фототок исследуемых ФЭ для монохроматических излучений всех длин волн оставался постоянным и составлял около 0,5 мкА; освещенная площадь составляла примерно 80% от всей рабочей площади ФЭ.

Кривые относительной спектральной чувствительности в видимой области спектра для ФЭ всех трех типов показаны на рис. 1. На том же рисунке приведена кривая спектральной чувствительности селенового ФЭ старого типа. Как видно, максимум кривых спектральной чувствительности у селеновых ФЭ разных типов лежит в пределах от 550 до 600 нм; различие спектральных кривых в синефиолетовой области спектра заметно больше, чем в красной.

На рис. 2 приведены кривые абсолютной спектральной чувствительности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра селенового ФЭ III типа, аналогичного ФЭ фирмы Lange (ФРГ),

нормального селенового ФЭ старого типа и вакуумного сурьмяноцезиевого ФЭ СЦВ-6.

Люкс-амперные характеристики. Были измерены на приборе (ФМ-79), специально сконструированном для этой цели, или на фотометрической скамье. Люкс-амперные характеристики измерялись при неутомленном состоянии исследуемых ФЭ (величина фототока фиксировалась через 2—3 с после соз-

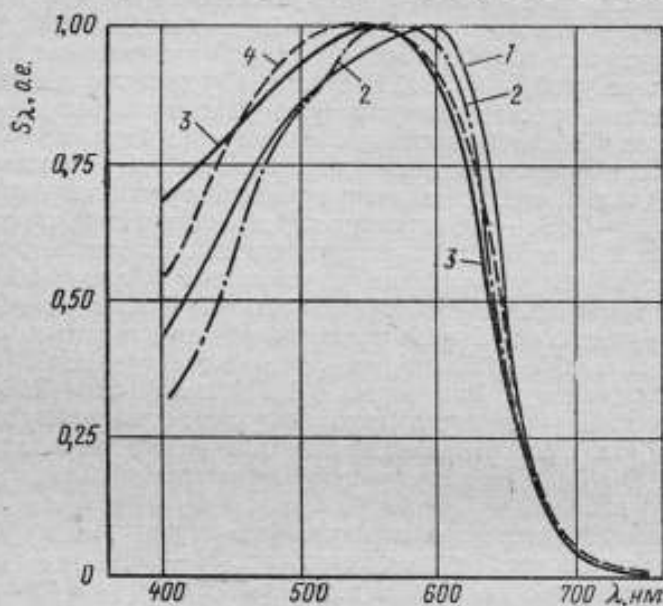


Рис. 1. Относительная спектральная чувствительность селеновых фотоэлементов разных типов:

1 — I типа (Se—CdSe—Au); 2 — II типа (Se—CdSe—CdO); 3 — III типа (Se—CdSe—Pt); 4 — ФЭ старого типа.

дания на ФЭ заданной освещенности). Изменение освещенности производилось в двух направлениях — сначала от малых освещенностей к большим, а затем — от больших к малым.

Люкс-амперные характеристики ФЭ I типа при различных нагрузочных сопротивлениях приведены на рис. 3. Заштрихованные на рис. 3 области (так же как и на последующих графиках) показывают разброс люкс-амперных характеристик для 10 образцов ФЭ с рабочей площадью  $10 \text{ см}^2$ ; диапазон изменения освещенностей и нагрузочных сопротивлений, показанный на графиках, соответствует возможным условиям работы ФЭ в светоизмерительных приборах.

Люкс-амперные характеристики ФЭ II типа (с верхним электродом из окиси кадмия) площадью  $3 \text{ см}^2$  приведены на рис. 4.

Диапазон изменения освещенностей (10—12 000 лк) и нагрузочных сопротивлений (2,5—10 кОм), показанный на этом рисунке, характерен для условий работы ФЭ в экспонометрических устройствах автоматических фотоаппаратов. Большой диапазон измеряемых освещенностей (яркостей фотографируемых объектов) приводит к тому, что в экспонометрических устройствах селено-

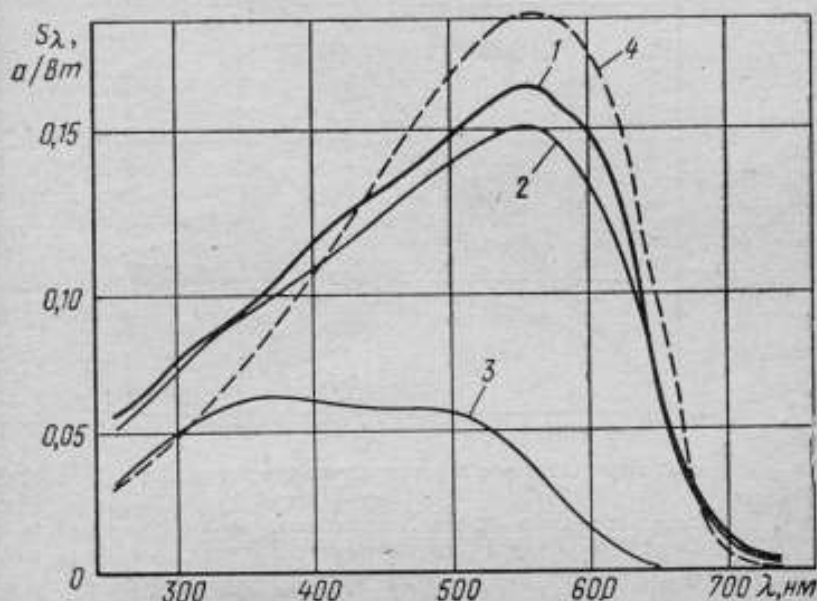


Рис. 2. Абсолютная спектральная чувствительность фотоэлементов для ультрафиолетовой области спектра:

1 — фотоэлемента III типа (Se—CdSe—Pt); 2 — фотоэлемента для ультрафиолетовой области фирмы Lange (ФРГ); 3 — вакуумного сурьмяноцезиевого фотоэлемента типа СЦВ-6; 4 — фотоэлемента ГОИ старого типа.

вые ФЭ работают в режиме, при котором их люкс-амперная характеристика резко нелинейна. Последнее вызывается включением в цепь ФЭ больших нагрузочных сопротивлений. Вследствие такого режима работы к ФЭ, применяемым в экспонометрических устройствах, предъявляются жесткие требования в отношении их утомляемости и температурного коэффициента. Как это видно из рис. 4, резкая нелинейность люкс-амперной характеристики приводит к тому, что малые изменения фототока, обусловленные, например, утомлением ФЭ или изменением температуры окружающей среды, вызывают значительные ошибки в определении освещенности.

На рис. 4 горизонтальные пунктирные линии показывают изменение фототока на 2% при освещенности 12 000 лк и нагрузочном сопротивлении 10 кОм, вертикальные пунктирные линии —



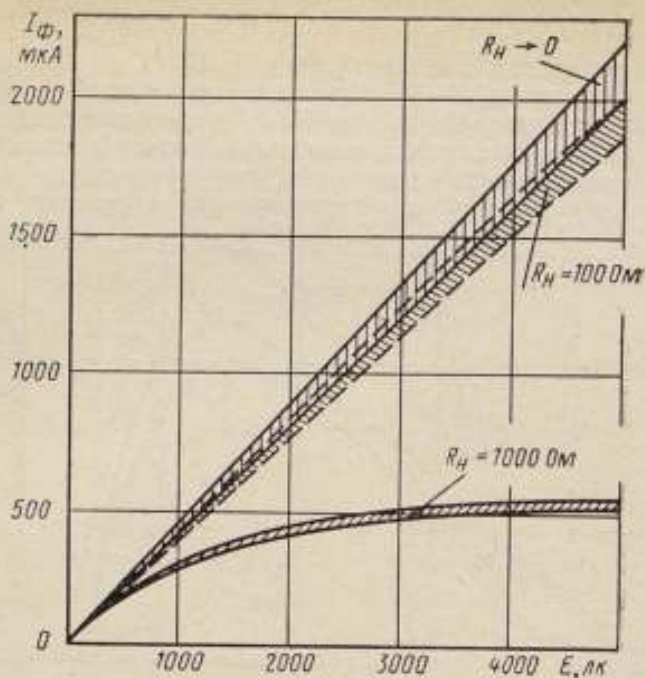


Рис. 3. Люкс-амперные характеристики селеновых фотоэлементов I типа (Se—CdSe—Au):

Рабочая площадь ФЭ — 10 см<sup>2</sup>. Заштрихованные области показывают разброс характеристик для 10 образцов.

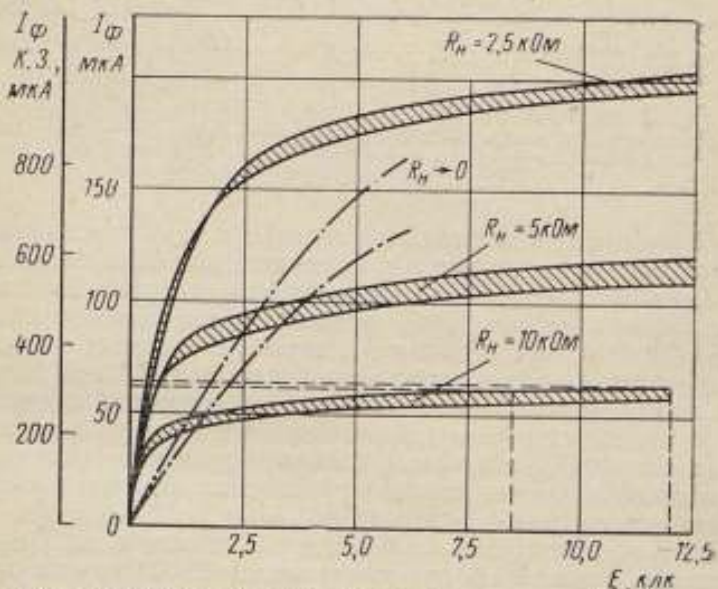


Рис. 4. Люкс-амперные характеристики селеновых ФЭ II типа (Se—CdSe—CdO):

Рабочая площадь ФЭ — 3 см<sup>2</sup>.

соответствующую этому изменению фототока ошибку в определении освещенности (вместо 12 000 лк будет измерено 8500 лк, т. е. ошибка составит 29%). Заштрихованные области показывают разброс люкс-амперных характеристик этих же ФЭ в режиме, близком к режиму тока короткого замыкания.

Люкс-амперные характеристики 10 шт. ФЭ III типа с рабочей площадью 3 см<sup>2</sup> приведены на рис. 5.

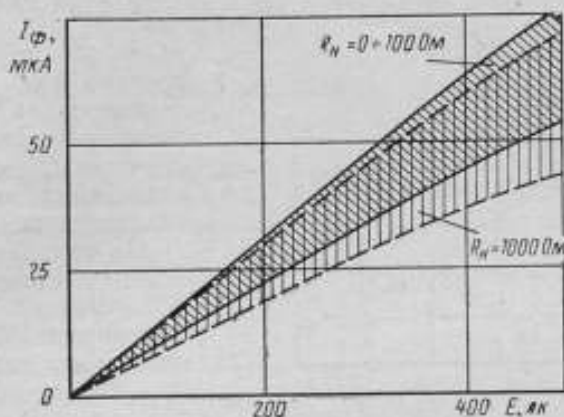


Рис. 5. Люкс-амперные характеристики селеновых фотоэлементов для ультрафиолетовой области спектра (III тип):

**Утомляемость.** Под утомляемостью ФЭ понимают изменение его фототока со временем при неизменной освещенности. При измерениях утомляемости за меру утомляемости принималась величина

$$\alpha = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}} 100,$$

где  $I_{\text{н}}$  и  $I_{\text{к}}$  — величины фототоков соответственно в начале и в конце испытаний.

Изменение фототока фиксировалось в течение 3 мин. после начала освещения ФЭ, причем 1-й отсчет фототока производился через 10 с после начала освещения.

Величина утомляемости зависит от условий работы ФЭ, главным образом от уровня освещенности и величины нагрузочного сопротивления. Величины утомляемости (в процентах), измеренные при различных режимах работы для ФЭ трех типов, приведены в табл. 1. Данные этой таблицы получены на основании результатов измерений 150 образцов ФЭ (по 50 образцов каждого типа). ФЭ нового типа при всех значениях нагрузочного сопротивления имеют значительно меньшую утомляемость.

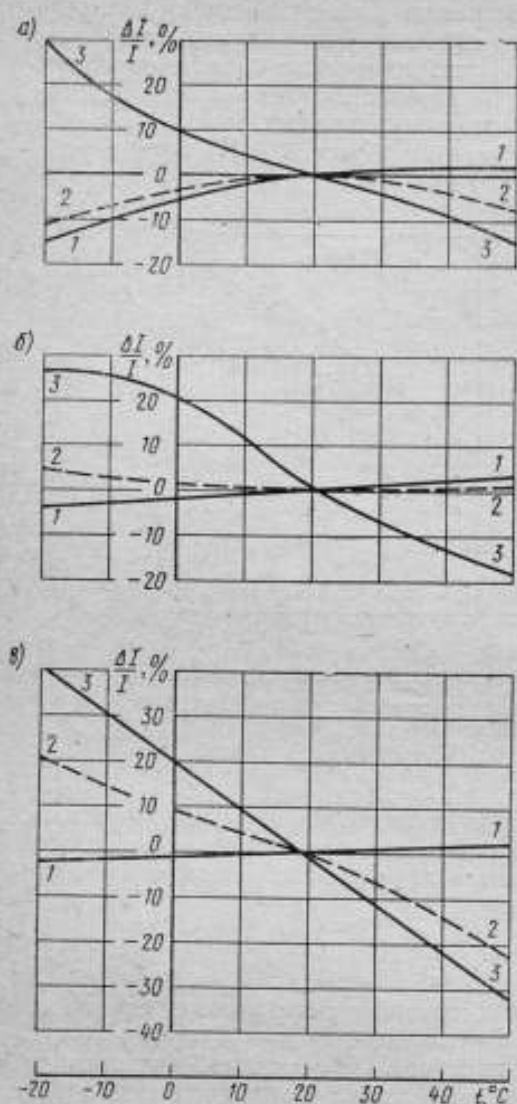


Рис. 6. Зависимость фототока от температуры для разных типов селеновых фотоэлементов при освещенности 100 лк и разных нагрузочных сопротивлениях:

1 —  $R_H = 0$ ; 2 —  $R_H = 10 \text{ кОм}$ ; 3 —  $R_H = \infty$ ; а — фотоэлементы II типа (Se-CdSe-CdO); б — фотоэлементы I типа (Se-CdSe-Au); в — фотоэлементы старого типа.

Температурный коэффициент чувствительности.

Известно, что величина температурного коэффициента чувствительности селеновых ФЭ зависит от уровня освещенности и величины нагрузочного сопротивления. Как показали исследования ФЭ I и II типов, величина их температурных коэффициентов ниже, чем у ФЭ старого типа.

На рис. 6 показано относительное изменение фототока (при освещенности 100 лк) в интервале температур от  $-20^\circ \text{C}$  до  $+50^\circ \text{C}$  при различных нагрузочных сопротивлениях для ФЭ трех типов. Кривые 1, 2 и 3 относятся соответственно к нагрузочным сопротивлениям 8 Ом, 10 кОм и 7 МОм. На графиках приведены усредненные данные для каждого типа ФЭ; величина фототока при комнатной температуре ( $+20^\circ \text{C}$ ) принята за 100%.

Средние значения температурного коэффициента ФЭ указанных типов в интервале температур  $+20 \div +50^\circ \text{C}$  и  $+20 \div -20^\circ \text{C}$  при разных освещенностях и нагрузочных сопротивлениях приведены в табл. 2. Температурный коэффициент вычислялся по формуле

$$\alpha_t = \frac{I_t - I_{20}}{I_{20}(t - 20)} 100\%,$$

где  $I_{20}$  — фототок при температуре  $+20^\circ\text{C}$ ;  
 $I_t$  — фототок при температуре  $+50^\circ\text{C}$  или  $-20^\circ\text{C}$ .

Данные табл. 2 показывают, что температурный коэффициент чувствительности ФЭ I и II типов и ФЭ старого типа в зависимости от уровня освещенности и величины нагрузочного сопротивления, может варьироваться в пределах от  $+0,01$  до  $-1,6\%$ . Исследование температурного коэффициента чувствительности ФЭ III типа не проводилось.

Таблица 2

Температурный коэффициент чувствительности (в  $\%$  · град ·  $\text{C}^{-1}$ )  
селеновых фотоэлементов разного типа при различных режимах работы

E, лк	$R_H$	Типы фотоэлементов					
		I Se-CdSe-Au		II Se-CdSe-CdO		Старый тип Se-CdSe-Au	
		$+20^\circ \div +50^\circ$	$+20^\circ \div -20^\circ$	$+20^\circ \div +50^\circ$	$+20^\circ \div -20^\circ$	$+20^\circ \div +50^\circ$	$+20^\circ \div -20^\circ$
100	8 Ом	+0,1	+0,1	+0,05	+0,4	+0,1	+0,1
	10 кОм	+0,03	-0,08	-0,2	+0,3	-1,0	-0,5
	7 МОм	-0,4	-0,7	-0,4	-0,7	-1,1	-1,6
1 000	1 Ом	+0,06	+0,1	+0,01	+0,4	+0,1	+0,1
	10 кОм	-0,2	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,5
	7 МОм	-0,3	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5	-0,7
10 000	1 Ом	+0,2	+0,01	-0,2	+0,01	+0,1	+0,1
	10 кОм	-0,2	-0,3	-0,3	-0,7	-0,2	-0,3
	7 МОм	-0,2	-0,4	-0,3	-0,7	-0,3	-0,3

Влагостойкость. С увеличением относительной влажности окружающей среды выше 80% параметры селеновых ФЭ, как правило, резко ухудшаются. Вместе с тем использование ФЭ в различных полевых приборах, особенно в экспонометрических устройствах фото-киноаппаратов, предъявляет к ним весьма высокие требования в отношении влагостойкости. В связи с этим в последнее время проводились исследования с целью повышения влагостойкости селеновых ФЭ, давшие положительные результаты.

Испытания ФЭ на влагостойкость проводились согласно нормам на климатические испытания фото-киноаппаратуры. Испытуемые ФЭ выдерживались в течение 3 суток в закрытой камере при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха 98%. Влагостойкость ФЭ оценивалась по изменению их токовой чувствительности и фото-э. д. с. Выдержавшими испытание условно считались те образцы, у которых изменение чувствительности по току и фото-э. д. с. не превышало соответственно  $\pm 10$  и  $\pm 20\%$  от первоначальных (до испытания) значений этих параметров.

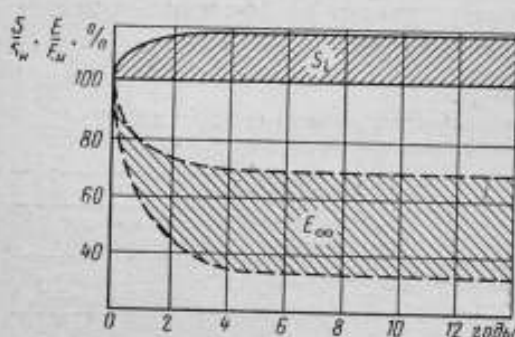


Рис. 7. Изменение параметров селеновых фотоэлементов во времени (старение).

ран большой экспериментальный материал, относящийся к изменению токовой чувствительности и фото-э. д. с., селеновых ФЭ как работающих в лабораторных условиях, так и хранящихся в затемненном состоянии на протяжении 10—15 лет.

Обобщая полученные данные, можно прийти к заключению, что у большинства ФЭ токовая чувствительность возрастает в первые 3 месяца после изготовления на 5—20%, а затем на протяжении многих лет остается практически постоянной. Фото-э. д. с. в процессе старения ФЭ, как правило, уменьшается, причем это уменьшение происходит в первые 3—5 месяцев и составляет 30—70%; затем фото-э. д. с. стабилизируется. Для иллюстрации процесса старения на рис. 7 показано изменение токовой чувствительности ( $S_i$ ) и фото-э. д. с. ( $E_{\infty}$ ) для 15 образцов селеновых ФЭ старого типа на протяжении 14 лет. Заштрихованные области показывают различие в поведении отдельных образцов. По наблюдениям за изменением параметров ФЭ I и II типов на протяжении 2—4 лет приходим к выводу, что по характеру старения они мало отличаются от ФЭ старого типа.

Поступила в редакцию  
20/IV 1971 г.



УДК 535.8 : 389.6

**О нормализации и измерениях характеристик  
оптических систем***С. А. Родионов*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 5—13.

Рассматриваются некоторые принципиальные вопросы, связанные с нормализацией характеристик оптических систем и предлагается один из вариантов нормализации. Оптическая система рассматривается как одно из звеньев в общей цепи передачи информации к физическим приборам. Освещается вопрос обеспечения измерительными приборами.

УДК 535.411

**Модуляционный метод измерения  
малых изменений разности фаз  
в интерференционных устройствах***И. Ш. Эцин*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 14—19.

Приведены результаты расчета предельной чувствительности модуляционного метода измерения малых изменений разности фаз в интерферометрах Майкельсона и Фабри-Перо. Показано, что наименьшее обнаруживаемое изменение разности фаз при некоторых условиях

может составлять  $\frac{2\pi}{6 \cdot 10^4}$ .

Таблиц 1, иллюстраций 2, библиографий 8.

УДК 535.853.4

**Применение интерферометров последовательного типа  
для измерительных целей***В. А. Москалев, И. М. Нагибина, Н. А. Полушкина,  
Л. П. Пригтелева*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 20—26.

Описан принцип работы интерферометра последовательного типа (ИПТ), показана возможность использования ИПТ для измерительных целей, рассмотрены пути повышения чувствительности и точности измерений при применении ИПТ в многолучевом варианте и с кратными длинами ветвей. Приведены примеры использования ИПТ для измерения аномальной дисперсии по методу «крюков» Д. С. Рождественского, для измерения напряженного состояния прозрачных моделей и для измерения распределения температуры в температурном поле дугового разряда.

Иллюстраций 5, библиографий 15.

**Оптические проекционные системы  
с повышенным контрастом  
для рассматривания фазовых объектов**

*А. Н. Карташев, К. С. Ошанина*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 27—30.

Описан проектор, предназначенный для применения в установках совмещения при контроле за совмещением рисунка, нанесенного на полупроводниковой структуре с рисунком фотошаблона.

Приведены результаты исследования предложенного метода повышения контраста изображения и разрешающей способности проектора.

Иллюстраций 2.

УДК 535.568.1 : 535.241.3

**О чувствительности объективных поляриметров  
с различными модуляторами**

*Е. А. Волкова, Е. С. Сорокина*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 31—35.

Дано описание двух методов модуляции (синусоидальная и прямоугольная модуляция) потока излучения, применяемых в объективных поляристорах. Приведены выражения, характеризующие чувствительность поляриметров в определенных условиях для каждого метода. На графиках кривые показывают зависимость чувствительности от амплитуды модуляции.

Иллюстраций 3, библиографий 12.

УДК 535.853.087.92 : 622.83

**Оптические преобразователи  
для измерения механических напряжений  
в горных породах**

*Н. В. Иванова*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 38—42.

Рассмотрена зависимость между оптической разностью хода в стеклянных датчиках и величинами горного давления в породах; рекомендованы определенные стекла каталога для использования в качестве оптических датчиков. Рассмотрена погрешность измерения разности фаз света в результате изменения ориентации датчика.

Таблиц 1, библиографий 8, иллюстраций 5.

Об измерении дисперсии жидких сред

*Б. А. Желудов*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 49—49.

Обоснована необходимость разработки нового способа и прибора для измерения рефракционной дисперсии жидких сред — рефракционного дисперсиометра с фотоэлектрической регистрацией. Дан анализ погрешностей, зависящих от ряда основных факторов. Сформулированы требования к отдельным элементам схемы прибора. Библиографий 11, таблиц 1.

О допустимой ширине щелей призматических монохроматоров

*В. Д. Дмитриев, Г. К. Холопов*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 50—53.

Дан метод расчета погрешности измерения яркостной температуры, обусловленной конечными размерами щелей монохроматора. Приведены допустимые размеры щелей для различных диапазонов спектра и соответственно обоснован выбор материалов призм монохроматоров.

Библиографий 2, иллюстраций 3.

Ленточная вольфрамовая лампа с сапфировым окном как образцовый источник излучения

*В. Д. Дмитриев, Г. К. Холопов*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 54—57.

Дано описание ленточной вольфрамовой лампы с сапфировым окном. Рассмотрена возможность использования такой лампы в качестве образцового излучателя для фотометрии и пирометрии в области спектра до 5 мкм.

Иллюстраций 2, таблиц 2, библиографий 9.

УДК 621.383.2 : 535.853.244

**Установка для определения спектральной чувствительности фотоэлементов**

*Б. М. Дрейфус, В. Е. Карташевская, Н. В. Пивоварова*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 58—62.

Описана установка для определения спектральной чувствительности фотоэлементов, осуществленная на базе двойного монохроматора Хилгер-Ваттс, при неподвижном расположении терморезистора и периодическом вводе и выводе фотоэлемента из светового пучка. Воспроизводимость измерений спектральной чувствительности в пределах 0,4—1,0 мкм оценена в  $\pm 0,5$ —1,0% для средней части спектра и около  $\pm 2\%$  на его краях. Систематическая погрешность составляет, вероятно, не более  $\pm 5\%$ .

Библиографий 5, иллюстраций 2.

УДК 535.243.25.089.6

**Градуировка фотометрической шкалы промышленных спектрофотометров**

*К. А. Дудина, Н. С. Москалева, Г. М. Сахарова*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 63—67.

Приведены методы градуировки фотометрической шкалы в промышленных спектрофотометрах, применяемые на Ленинградском оптико-механическом объединении, и описания конструкции вращающихся дисков.

Даны результаты сличения спектрофотометра СФ-16 с зарубежными спектрофотометрами.

Таблиц 2, библиографий 4, иллюстраций 1.

УДК 535.641.2

**О цветовом пороге около белого цвета**

*Е. Н. Юстова, И. Н. Панова, Н. М. Никитина*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 66—73.

Приведены данные измерения первого порога цвето-различения в разных направлениях от белого цвета. Измерения выполнены на вертушке Максвелла восемью наблюдателями в наиболее благоприятных условиях наблюдения двумя глазами при естественном дневном свете. Вариации порогов по различным направлениям для одного наблюдателя оказались меньше, чем вариации порогов различных наблюдателей по одному и тому же направлению. Средний порог около белого по всем направлениям и для всей группы наблюдателей составляет примерно 0,3%. Этот результат следует учитывать при формулировке требований к точности измерений на фотоэлектрических компараторах цвета.

Таблиц 4, библиографий 9, иллюстраций 1.

УДК 535.653.8

**Новые таблицы для испытания цветного зрения**

*К. А. Алексеева, Е. Н. Югова*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 74—85.

На базе колориметрического атласа ВНИИМ составлены пары не различимых дихроматами цветов в условиях дневного (источник С) и вечернего (источник А) освещения. Для каждой пары цветов измерено число порогов цветоразличения для наблюдателя с нормальным цветным зрением. По методике, аналогичной изготовлению образцов цвета атласа ВНИИМ, изготовлены таблицы (в виде кольца Ландольта) для количественной оценки дефекта цветного зрения.

Таблиц 3, библиографий 10, иллюстраций 6.

УДК 535.668.6

**Разработка метода и шкалы  
для контроля белизны целлулоида**

*И. Н. Панова*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 86—94.

Рассматривается один из способов оценки белизны с помощью специально изготовленных шкал слабоокрашенных образцов. Приводится пример разработки такой шкалы для белых целлулоидов.

Таблиц 2, библиографий 6, иллюстраций 6.

УДК 535.68

**Метод колориметрического контроля  
качества красителей**

*В. Г. Бочаров*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 95—100.

Сопоставляются визуальная и колориметрическая оценки малых цветовых различий. Приводится количественная оценка (в единицах Мак-Адама) балльной шкалы, используемой в химической и текстильной промышленности. Показана возможность введения числовых допусков на цветовые различия для всего ассортимента отечественных красителей.

Библиографий 4, иллюстраций 5.



Исследование и разработка интегратора  
для автоматического расчета координат цвета

*Т. Г. Гогшвили*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 101—106.

Рассматривается один из возможных путей автоматизации расчета координат цвета по спектрофотометрическим данным, нанесенным на стандартный бланк.

Дается краткий обзор методов и средств для определения координат цвета, а также предлагается модернизация известного метода.

Описывается функциональная схема и принцип работы интегратора цвета, разработанного в Тбилиском научно-исследовательском институте.

Иллюстраций 1, библиографий 5.

Исследование характеристик селеновых фотоэлементов,  
применяемых для световых измерений

*Н. С. Базилевская, Т. А. Болдырева, С. И. Фрейверт*

Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области оптических и световых измерений, вып. 144 (204), 1973 г., стр. 107—116.

Изложены результаты исследования селеновых фотоэлементов, используемых в качестве приемников при световых измерениях. Дана классификация современных селеновых фотоэлементов. Приведены значения интегральной и тоновой фото-э.д.с. для всех типов фотоэлементов и зависимость чувствительности от длины волны, люкс-амперные характеристики, утомляемость, температурные характеристики, влагоустойчивость и старение.

Таблиц 2, иллюстраций 7.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<i>С. А. Родионов.</i> О нормализации и измерениях характеристик оптических систем . . . . .	5
<i>И. Ш. Эцин.</i> Модуляционный метод измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах . . . . .	14
<i>В. А. Москалев, И. М. Нагибина, Н. А. Полушкина, Л. П. Приятелева.</i> Применение интерферометров последовательного типа для измерительных целей . . . . .	20
<i>А. И. Карташев, К. С. Ошанина.</i> Оптические проекционные системы с повышенным контрастом для рассматривания фазовых объектов . . . . .	27
<i>Е. А. Волкова, И. С. Сорокина.</i> О чувствительности объективных поляриметров с различными модуляторами . . . . .	31
<i>Н. В. Иванова.</i> Оптические преобразователи для измерения механических напряжений в горных породах . . . . .	36
<i>Б. А. Желудов.</i> Об измерении дисперсии жидких сред . . . . .	43
<i>В. Д. Дмитриев, Г. К. Холопов.</i> О допустимой ширине щелей призматических монохроматоров . . . . .	50
<i>В. Д. Дмитриев, Г. К. Холопов.</i> Ленточная вольфрамовая лампа с сапфировым окном как образцовый источник излучения . . . . .	54
<i>Б. М. Дрейфус, В. Е. Карташевская, Н. В. Пивоварова.</i> Установка для определения спектральной чувствительности фотоэлементов . . . . .	58
<i>К. А. Дудина, Н. С. Москалева, Г. М. Сахарова.</i> Градуировка фотометрической шкалы промышленных спектрофотометров . . . . .	63
<i>Е. Н. Юстова, И. Н. Панова, Н. М. Никитина.</i> О изетовом пороге около белого цвета . . . . .	68
<i>К. А. Алексеева, Е. Н. Юстова.</i> Новые таблицы для испытания цветового зрения . . . . .	74
<i>И. Н. Панова.</i> Разработка метода и шкалы для контроля белизны целлулоида . . . . .	86
<i>В. Г. Бочаров.</i> Метод колориметрического контроля качества красителей . . . . .	95
<i>Т. Г. Гогичвили.</i> Исследование и разработка интегратора для автоматического расчета координат цвета . . . . .	101
<i>Н. С. Базилевская, Т. А. Болдырева, С. И. Фрейверт.</i> Исследование характеристик селеновых фотоэлементов, применяемых для световых измерений . . . . .	107
Рефераты публикуемых статей . . . . .	117

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ  
И СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Труды метрологических институтов СССР  
Выпуск 144 (204)

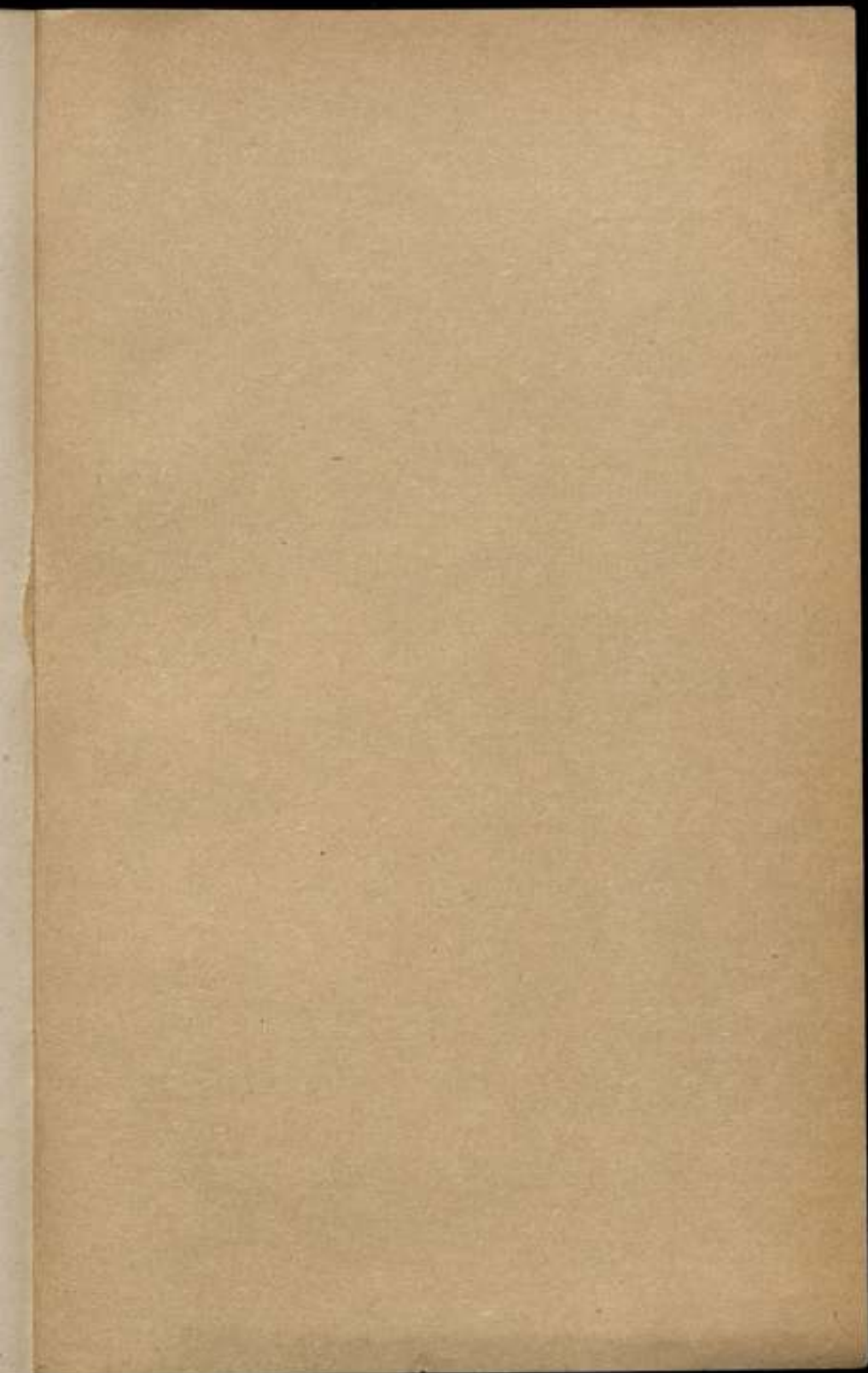
Редактор *Н. Н. Александрова*  
Техн. редактор *Э. Г. Вигер*

---

Сдано в набор 10/XII 1972 г. Подписано в печать 19/VI 1973 г.  
Формат бумаги 60×90<sup>1/16</sup>. Печ. л. 7,7. Уч.-изд. л. 8,3  
М-36650 Тираж 1000 экз. Цена 92 коп.

---

Владимирская типография Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли  
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.



Цена 92 коп.