

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
И ИЗМЕРЕНИЙ ЛУЧИСТОЙ
ЭНЕРГИИ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 56(116)

СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1961

10
11
12
13
14
15
16



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

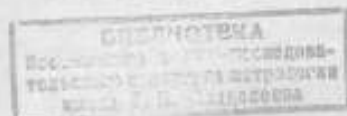
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
И ИЗМЕРЕНИЙ ЛУЧИСТОЙ
ЭНЕРГИИ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 56(116)

Под редакцией

*канд. техн. наук Н. Р. БАТАРЧУКОВОЙ,
канд. техн. наук В. Е. КАРТАШЕВСКОЙ*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
• СТАНДАРТИЗ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1961

2
12684

Содержание

ИСТОРИЯ И ОБЪЕКТЫ
ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО
МУЗЕЯ ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО
МУЗЕЯ

ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ

ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ

ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ

1982

Ответственный редактор
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит ряд статей, отражающих актуальные вопросы применения оптических методов для решения метрологических задач, а также вопросы, связанные со световыми и энергетическими измерениями лучистой мощности, колориметрией и сенситометрией.

В связи с совершившимся в октябре 1960 г. переходом на новое определение метра числом длин световых волн особенно актуальными являются работы, посвященные интерференционным измерениям длины. Принятое XI Генеральной конференцией по мерам и весам постановление предусматривает дальнейшее усовершенствование нового эталона и его практическое внедрение.

С целью дальнейшего усовершенствования нового эталона единицы длины становится весьма актуальным при интерференционных измерениях длины использование спектральных линий, возбуждающихся с наименьшим возможным внешним возмущением соответствующих уровней энергии. В этом отношении большим преимуществом обладают линии поглощения при положительном решении вопроса возможности наблюдения в них интерференции. Оказывается, с помощью интерферометров можно обратить спектр поглощения и как бы получить светлые полосы с контуром линии поглощения. Описанию метода получения нового когерентного источника света, основанного на обращении спектра поглощения йода с помощью интерферометра Рождественского, посвящена статья Н. Р. Батарчуковой, А. И. Карташева и А. П. Кириченко.

В статье Н. Р. Батарчуковой и Ю. П. Ефремова изложены результаты исследования и применения к измерению длины концевых мер метода объективной оценки дробной части порядка интерференции при фотоэлектрической регистрации интерференционных полос равного наклона. В статье Ю. И. Трулева изложен новый метод фотоэлектрической регистрации ахроматической интерференционной полосы в белом свете, причем в качестве детектора ахроматической полосы использован фотоэлемент со специально подобранным светофильтром. Обе эти работы следует рассматривать как подготовительные к созданию автоматических приборов для интерференционных измерений длины.

Правильная постановка вопроса, связанного с измерением угла вращения плоскости поляризации в сахариметрии и в производстве синтетических материалов, имеет большое экономическое значение. Само собой разумеется, что весьма важным в области оптических измерений является установление единства поляриметрических измерений в стране. Этому вопросу посвящена статья Е. А. Волковой, в которой изложены

результаты исследования кварцевых поляризационных пластинок, выпускаемых отечественной промышленностью, и на основании этого сформулированы требования, которые необходимо предъявить к образцовым мерам угла вращения плоскости поляризации.

Метрологические работы в области световых и энергетических измерений до сих пор велись независимо друг от друга. Однако в дальнейшем в силу внутренней связи между световыми и энергетическими величинами не исключена возможность создания единого исходного эталона (в виде излучателя или приемника лучистой мощности), обслуживающего одновременно обе области измерений. Первым шагом на этом пути является работа В. Е. Карташевской по опытному определению светового эквивалента лучистой мощности, где одной из задач была опытная проверка согласованности, имеющейся в результатах световых и энергетических измерений.

Частному, но существенному в практике вопросу измерения потока лучистой мощности в пучке ограниченных размеров посвящена другая статья того же автора. Предложенный метод может найти применение в некоторых случаях точных спектральных измерений при исследованиях различных приемников лучистой мощности.

Статья Т. Н. Андреевой, В. Е. Карташевской и С. П. Скачковой содержит описание установки, созданной для проверки объективных люксметров массового применения, что решает важную задачу по обслуживанию нужд народного хозяйства.

Три статьи Е. Н. Юстовой по колориметрии отвечают трем основным направлениям работ, ведущихся во ВНИИМ в этой области: созданию образцовой аппаратуры для точных цветовых измерений; исследованию свойств цветного зрения, как основы для разработки методов и приборов для цветовых измерений, и непосредственному обслуживанию народного хозяйства.

В первой статье дано описание и результаты исследования образцового колориметра-прибора, обеспечивающего высокую точность измерений в силу ряда его конструктивных особенностей.

Вторая статья посвящена вопросу создания рационально устроенных и научно обоснованных колориметрических таблиц для испытаний цветного зрения при профессиональном отборе. Вопрос о метрологическом контроле за средствами испытания цветного зрения здесь решается впервые. Работы по исследованию цветного зрения и их метрологическая направленность способствуют общему развитию научной и практической колориметрии в деле стандартизации цветовых измерений.

Статья по созданию стеклянных шкал канифоли И. С. Громовой и Е. Н. Юстовой излагает конкретный случай создания образцов цвета для нужд данного производства. Этот опыт является частью общей большой задачи по разработке образцов цвета и цветных шкал, имеющей целью унификацию цветовых измерений в стране.

Вопросам проверки новых кривых сложения посвящена статья Г. Н. Раутиана.

В двух последних статьях В. А. Коридорф, И. А. Черного рассматриваются вопросы резольвентности. В одной — приведены результаты исследования разрешающей способности некоторых черно-белых и цветных фотографических материалов в зависимости от апертуры объектива резольвентометра. Вторая статья излагает метод изготовления высокоразрешающих и высококонтрастных фотопластинок. Рассмотренные вопросы имеют важное значение для целей стандартизации резольвентметрических измерений в нашей стране.

Редактор

Н. Р. БАТАРЧУКОВА, А. И. КАРТАШЕВ,
А. П. КИРИЧЕНКО

ВНИИМ

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ УСЛОВИИ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

В статье изложен метод получения когерентного излучения, основанный на так называемом обращении спектра поглощения. Поглощающую камеру помещают в одно из плеч интерферометра Майкельсона или Рождественского, отъюстированного так, чтобы разность хода в обоих плечах была равна нулю. Тогда будут интерферировать все лучи, кроме тех, длина волны которых поглощена в камере, и на темном минимуме появится свет когерентного излучения.

При выборе излучения для первичного эталона единицы длины и длин волн все усилия исследователей до сих пор были направлены на изучение линий спектров испускания. Длины волн линий испускания некоторых строго монокроматических источников света с четными изотопами высокой чистоты воспроизводимы и неизменны в пределах точности современных методов интерференционных измерений ($10^{-8} \pm 10^{-9}$).

В резолюции Консультативного комитета 1953 г. [1] указывается, что световая волна, используемая в качестве первичного эталона единицы длины, должна определяться двумя спектральными термами атома, спектр которого не имеет сверхтонкой структуры, и эти термы не подвергаются каким-либо внешним возмущающим воздействиям.

Трудно себе представить реальный источник света с излучающими атомами в условиях, отвечающих требованиям этой резолюции. При возбуждении спектра обязательными являются наличие электромагнитных полей, нестабильность нагрева и изменение давления паров излучающего вещества под влиянием изменения температуры.

Эти причины и ограничивают точность воспроизведения длин световых волн.

Несколько иная картина получается при использовании линий поглощения. В поглощающих камерах отсутствуют электрическое и магнитное поля, а температура и давление поглощающего вещества могут быть точно определены и хорошо воспроизводимы. Неизменность длины световой волны линий поглощения при выбранных давлении и температуре в камере с поглощающим веществом является их преимуществом по сравнению с эмиссионными линиями.

Д. С. Рождественский предлагал использовать линии поглощения для метрологических работ. Это предложение, однако, до последнего

времени не нашло отражения в исследованиях при выборе нового эталона единицы длины и длин волн.

Совсем недавно появились работы по выяснению возможности использования линий поглощения при интерференционных измерениях длины. Фасти [2] с этой целью исследовал две линии поглощения йода, соответствующие по длинам волн зеленой линии ртути. Интерференцию в линиях поглощения он наблюдал обычным способом на фоне зеленой линии λ 5461 Å Hg¹⁹⁸, уширенной за счет эффекта Зеемана и повышенного давления в источнике. Безэлектродная лампа Мергера с Hg¹⁹⁸ была помещена в магнитное поле так, чтобы направление светового потока от лампы совпадало с направлением силовых линий поля. С помощью пластинки в четверть длины волны в сочетании с поляризатором выделяли один из зеемановских компонентов λ 5461 Å Hg¹⁹⁸, свет от которого попадал в абсорбционную камеру с J₂ длиной 1000 мм, охлажденную до 254° К. Напряженность магнитного поля была подобрана таким образом, чтобы одна из нескольких линий поглощения J₂ совпала бы с зеленой линией Hg¹⁹⁸. В качестве прибора высокой разрешающей силы был использован интерферометр Фабри-Перо с разностью хода 150 мм.

Регистрация интерференционной картины производилась с помощью фотоэлектрического устройства. Наблюдаемая полуширина двух линий поглощения йода, равная 0,030 см⁻¹, в 2,5 раза превышала теоретическую доплеровскую ширину.

Участок фона, на котором наблюдается линия поглощения по методу Фасти, должен быть однородным по интенсивности и достаточно узким, чтобы не было переналожения порядков интерференции. Для этого необходимо, чтобы ширина эмиссионной линии, создающей фон, была равна области дисперсии эталона. Таким образом, для каждой данной разности хода нужно выбирать соответствующую ширину линии источника, что приводит к дополнительным затруднениям.

В дальнейшем Фасти предполагает в качестве исследуемой линии взять резонансную линию 2537 Å Hg¹⁹⁸ и ставит вопрос о рассмотрении этой линии в поглощении атомным пучком естественной ртути. Длину волны λ 2537 Å в поглощении можно рассматривать как первичную нормаль, эталонируя по ней все эмиссионные линии других монохроматических источников света. Несмотря на то, что экспериментально Фасти этой работы не сделал, предложенная им методика сравнения эмиссионных линий с линиями поглощения исключительно полезна, так как она позволяет выяснить, имеет ли место асимметричное уширение в эмиссионных линиях и, таким образом, помогает уточнить форму контура линий.

Другой метод, позволяющий использовать линии поглощения при измерениях длины, основывается на так называемом обращении спектров поглощения. Так, например, Гриффитс и Дике в своей работе [3] теоретически обосновали возможность осуществления нового когерентного источника, основанного на этом принципе. Подобно способу, впервые осуществленному Л. Н. Добрецовым и А. Н. Терениным [4], атомный пучок возбуждается оптическим способом (резонансная флуоресценция). Для того чтобы выделить из возбуждающего излучения когерентное, распространяющееся по направлению светового луча, атомный пучок следует поместить перпендикулярно световому лучу в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера, предварительно отъюстированного так, чтобы в поле зрения была видна одна темная полоса. Далее предполагается наблюдать светлую линию, образующуюся в минимуме за счет остаточного когерентного излучения.

Кесслер и др. [5] осуществили новый источник света, основанный на вышеприведенных теоретических предпосылках. Если в одно из плеч интерферометра Майкельсона, отъюстированного так, что в поле зрения наблюдают всего лишь один минимум, поместить абсорбционную камеру или атомный пучок с веществом, поглощающим центральную часть контура эмиссионной линии, то излучение во втором плече, с которым поглощаемое излучение ранее интерферировало, пройдет через интерферометр. Таким образом было получено обращение спектра поглощения, при котором линия поглощения делается светлой, а фон — темным.

Излучение λ 2537 Å от безэлектродной лампы Метгера, содержащей Hg^{198} , проходит через атомный пучок естественной ртути, помещенный в одно из плеч интерферометра Майкельсона. Так как поглощающий пучок может реагировать только на те частоты, которые попадают в огибающую контура используемой эмиссионной линии, то поглощать будут лишь атомы Hg^{198} , находящиеся в естественной смеси изотопов. Далее излучение, прошедшее через интерферометр Фабри-Перо с разностью хода 392 мм, регистрируют с помощью фотокомпенсационного детектора. Наблюденная полуширина обращенной линии составила $0,008 \text{ см}^{-1}$.

Если принять во внимание аппаратную ширину интерферометра и наложение компонента Hg^{201} на Hg^{198} , то истинная полуширина линий составит $0,002 \text{ см}^{-1}$.

Во ВНИИМ вопрос о возможности обращения спектра поглощения был поставлен еще в начале 1949 г. [6], экспериментальная проверка была осуществлена в 1959 г. дипломантом ЛГУ Ю. П. Каневским. Одним из основных затруднений при проведении этих исследований была необходимость работы в ультрафиолетовой области спектра.

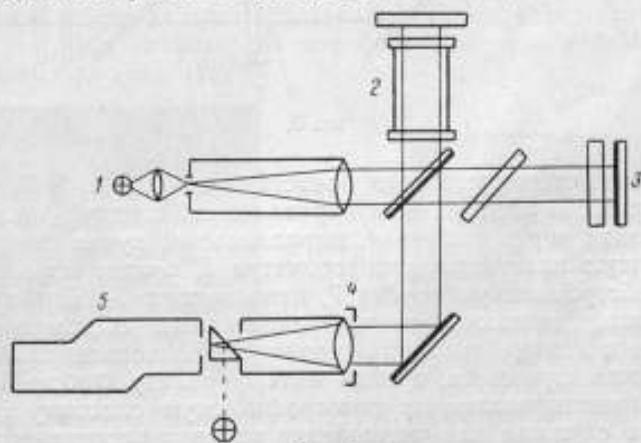


Рис. 1.

Представляет интерес осуществление подобной схемы для видимой области спектра. Наиболее богатым по количеству линий поглощения в видимой области является спектр йода. Абсорбционную камеру 2 длиной 30 см, содержащую пары йода, помещали в одно из плеч интерферометра Майкельсона (рис. 1). Источником света служила обычная лампочка накаливания 1. Вращением и перемещением зеркала 3 была получена интерференционная картина с очень широкими минимумами, соответствующими нулевой разности хода в интерферометре. Диафрагмой 4 из интерференционной картины выделялся минимум. Разложив

в спектр с помощью спектрографа 5 излучение, выходящее из интерферометра Майкельсона после поглощения света в одном из его плеч, можно увидеть в поле зрения светлые линии на темном фоне в местах, соответствующих положению линий поглощения. На рис. 2 приведена фотография этой картины, где *a* — обычный спектр поглощения йода; *b* — обращенный спектр.

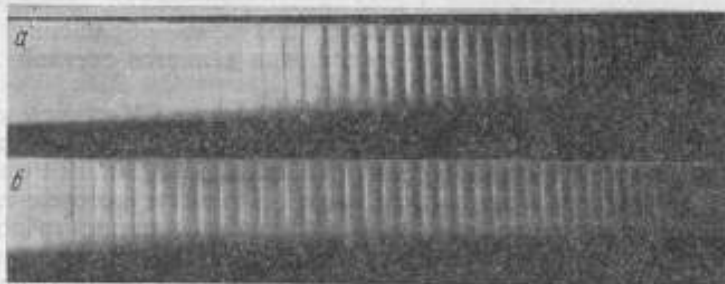


Рис. 2.

Поскольку интерферометр Майкельсона чрезвычайно чувствителен к малейшим механическим сотрясениям, при дальнейшей работе был использован интерферометр Рождественского.

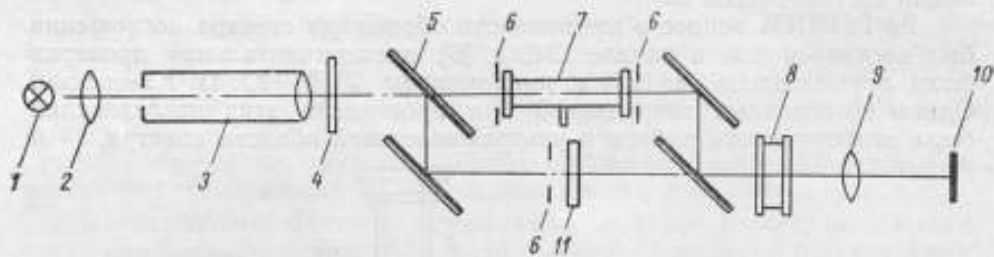


Рис. 3.

Оптическая схема установки представлена на рис. 3. Свет от источника 1 с помощью линзы 2 фокусировался на входную щель коллиматора 3. Пройдя через фильтр 4, параллельный пучок света падал на полупрозрачную пластину интерферометра 5, в одно из плеч которого помещали абсорбционную трубку 7, наполненную I_2 . Для компенсации разности хода, появляющейся при прохождении светом окон камеры, в другое плечо интерферометра вводилась плоскопараллельная пластина 11. Далее луч света, пройдя интерферометр Фабри-Перо 8, объективом 9 проектировался на фотографическую пластину 10. Круглые диафрагмы 6 служили для уменьшения влияния рассеянного света.

Абсорбционная камера представляла собой стеклянную трубку (диаметр 40 мм, длина 300 мм), к шлифованным торцам которой были приклеены плоскопараллельные пластины. Кристаллический йод помещали в отросток, припаянный к трубке камеры, погружали отросток в дьюар с жидким азотом и припаявали абсорбционную камеру к вакуумной установке. После тщательной откачки воздуха из трубки и прогревания ее стенок камеру отпаявали.

На рис. 4 изображена установка. Источником света служила дуговая лампа с естественной ртутью (типа ДРС-50). Каждая из пар зеркал интерферометра Рождественского закреплена на довольно массивных металлических блоках, удаленных друг от друга на расстояние в 1 м.

Один из блоков имел регулировочные винты для установки его зеркал параллельно зеркалам второго блока и для изменения ширины полос в интерференционной картине. Полупрозрачные зеркала в интерферометре закреплены на блоках неподвижно. Локализацию полос в беско-

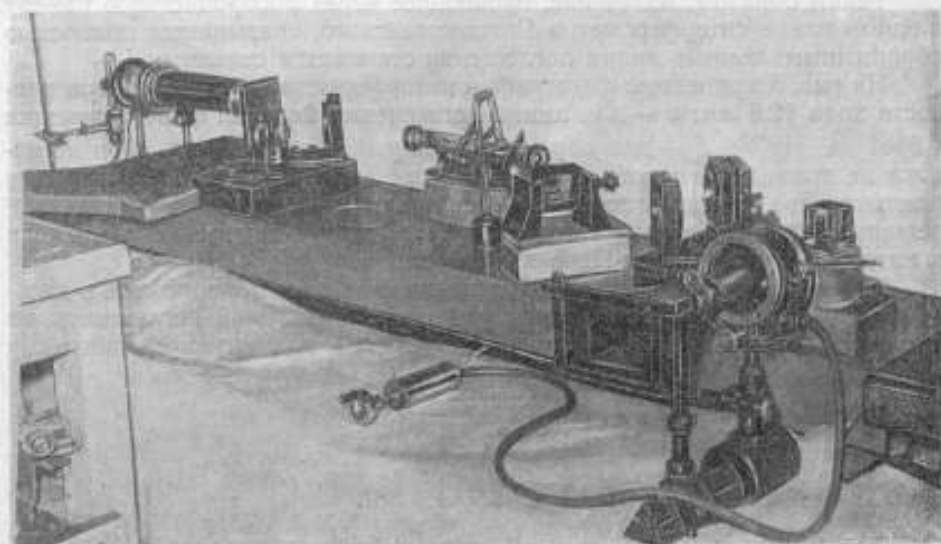


Рис. 4.

нечности осуществляли юстировочными винтами одного из отражающих зеркал. Ртутная лампа и интерферометр Рождественского с абсорбционной камерой в одном из плеч представляли собой когерентный источник, излучение которого анализировали с помощью интерферометра Фабри-Перо с разностью хода 12,6 м.м.



а)



б)

Рис. 5.

Для обеспечения удовлетворительной контрастности интерференционных полос и полного обращения картины необходимо наличие нулевой разности в интерферометре Рождественского и весьма точное уравнивание по интенсивности пучков света в двух плечах интерферометра. Нулевой разности хода в белом свете в интерферометре Рождественского можно добиться определенным наклоном компенсирующей пластины.

В установке предусмотрена возможность наблюдения и фотографирования фона от источника, истинного поглощения йода на фоне зеленой линии ртути при выключении разделяющей пластины интерферометра Рождественского и, наконец, обращенной картины поглощения.

Таким образом, излучение, прошедшее через абсорбционную камеру в одном плече интерферометра Рождественского, оказывается полностью обращенным: темные линии поглощения становятся светлыми.

На рис. 5 приведены фотографии интерференционных колец при разности хода 12,6 мм: *a* — для линий поглощения йода на фоне излучения λ 5461 Å Hg¹⁰⁰; *b* — для обращенной картины поглощения. Фон источника не приведен, так как интерференционная картина была совершенно размыта. Две линии поглощения йода, накладывающиеся на фон, не разрешены. Обращение темной полосы в светлую при данной разности хода в интерферометре Фабри-Перо хорошо видно.

Метод обращения спектра поглощения йода даст возможность в дальнейшем выяснить более точно контуры отдельных линий поглощения, их структуру, измерить их ширину и использовать для интерференционных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Procès-Verb., C. C. du Mètre, Séance, 1957.
2. Fastie W. G., «Journ. de Phys. et Rad.», v. 19, № 3, 1958, p. 405.
3. Griffiths R. B., Dicke R. H., «Rev. of Scien. Instrum.», v. 28, № 8, 1957, p. 646.
4. Terenin A. N., Dobretsov L. N., Naturwissenschaften, Bd. 16, 1928, S. 656.
5. Kessler K. G., Barger R. L., Schweitzer W. G., Symposium on Interferometry, National Physical Laboratory, Meddington, Middlessex, from 9-th — 11-th June, 1959.
6. Батарчукова Н. Р., Одноизотопные источники света в метрологии, УФН, т. LVI, вып. 2, 1955, стр. 265.

Поступила в редакцию
28/XII 1959 г.

Ю. И. ТРУЛЕВ

ВНИИМ

РЕГИСТРАЦИЯ АХРОМАТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В БЕЛОМ СВЕТЕ

В работе изложен метод фотоэлектрической регистрации ахроматической полосы интерференционной картины в белом свете.

Для дистанционного управления сравнительными измерениями на большом горизонтальном интерферометре ВНИИМ [1] и для автоматизации этих измерений необходима фотоэлектрическая регистрация ахроматической полосы интерференционной картины в белом свете. Надежная регистрация последней возможна в том случае, если электрический сигнал, соответствующий ахроматической полосе, хорошо отличим от сигналов соседних полос.

При использовании для этой цели фотоэлементов разности хода, при которых имеют место экстремальные значения фототока, определяются относительным распределением лучистой энергии источника света по спектру и спектральной чувствительностью приемника излучения [2]. Иначе говоря, участки спектра, для которых разность хода близка к величине, кратной нечетному числу полуволн, ослабляются за счет интерференции, а реакция фотоэлемента зависит от его спектральной чувствительности и спектрального состава интерферирующих лучей.

Одним из условий получения хорошей «видимости» ахроматической полосы по сравнению с соседними полосами является условие, при котором спектральная чувствительность фотоэлемента, приведенная к относительному распределению лучистой энергии источника света по спектру, должна сохранять постоянное значение в достаточно широком спектральном интервале. В случае применения фотоумножителей и фотоэлементов с внешним эффектом, ширина этого интервала определяется спектральной чувствительностью фотокатода.

Равномерность спектральной чувствительности можно обеспечить с помощью светофильтра. Исходя из этих положений, можно предъявить определенные требования к выбору фотоэлемента и светофильтра. Чувствительность фотоэлемента должна охватывать по возможности большую часть спектрального интервала пропускания оптических стекол

(350–2700 мкм). Кривую спектрального пропускания светофильтра $\tau(\lambda)$ можно рассчитать с точностью до постоянного множителя по формуле

$$\tau(\lambda) = \frac{1}{I(\lambda)r(\lambda)},$$

где $I(\lambda)$ — относительное распределение энергии источника света по спектру;

$r(\lambda)$ — кривая спектральной чувствительности фотоэлемента.

Для регистрации распределения интенсивности в интерференционной картине в белом свете использовали стандартный интерферометр ПИУ-1, который был отъюстирован так, что выходная щель вырезала только часть интерференционной полосы и проектировалась на катод фотоумножителя, фототок которого записывался регистрирующим прибором НЗ73-2.

«Видимость» ахроматической полосы определяется по записи фототока с изменением разности хода интерферирующих лучей; за меру «видимости» K принимается отношение

$$K = \frac{I_0 - I_1}{I_0} 100\%.$$

При измерениях применялись фотоумножители ФЭУ-19М и ФЭУ-22. Применение ФЭУ-19М не дало удовлетворительных результатов: «видимость» ахроматической полосы не превышала 10% и даже применение светофильтров не привело к заметному улучшению. Этот результат можно объяснить довольно узким интервалом спектральной чувствительности ФЭУ-19. Применение ФЭУ-22 с более широким спектральным интервалом дает заметное улучшение «видимости» ахроматической полосы (рис. 1).

Светофильтры, использованные в ходе работы, подбирали на основании вышеприведенных соображений.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики светофильтров. Прерывистой линией обозначена расчетная кривая спектрального пропускания для ФЭУ-22 и лампы накаливания с цветовой температурой 2840° К в видимой области спектра. Был проведен ряд измерений с различными светофильтрами. Наиболее близко к расчетной кривой подходит кривая пропускания светофильтра СЗС-17 толщиной 3 мм. Результаты измерений с различными светофильтрами приведены в таблице.

$K, \%$	10	18	28	24	32
Тип фотоумножителя	ФЭУ-19М без светофильтра	ФЭУ-22 без светофильтра	ФЭУ-22 и СЗС-7	ФЭУ-22 и СЗС-15	ФЭУ-22 и СЗС-17

Таким образом, соответствующим подбором фотоэлемента и светофильтра можно довести «видимость» ахроматической полосы до 30–35%. На рис. 3 приведена запись распределения интенсивности полос с ФЭУ-22 и светофильтром СЗС-17.

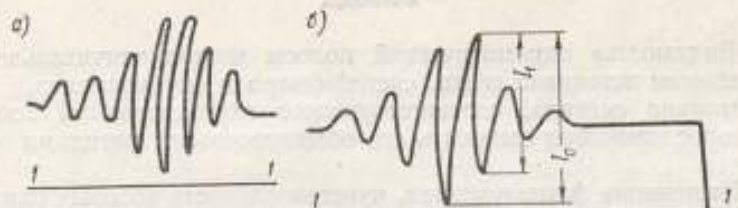


Рис. 1. Распределение интенсивности в интерференционной картине при регистрации с помощью фотоумножителей без светофильтра.

а) ФЭУ-19М; б) ФЭУ-22; линия I-I соответствует темновому току.

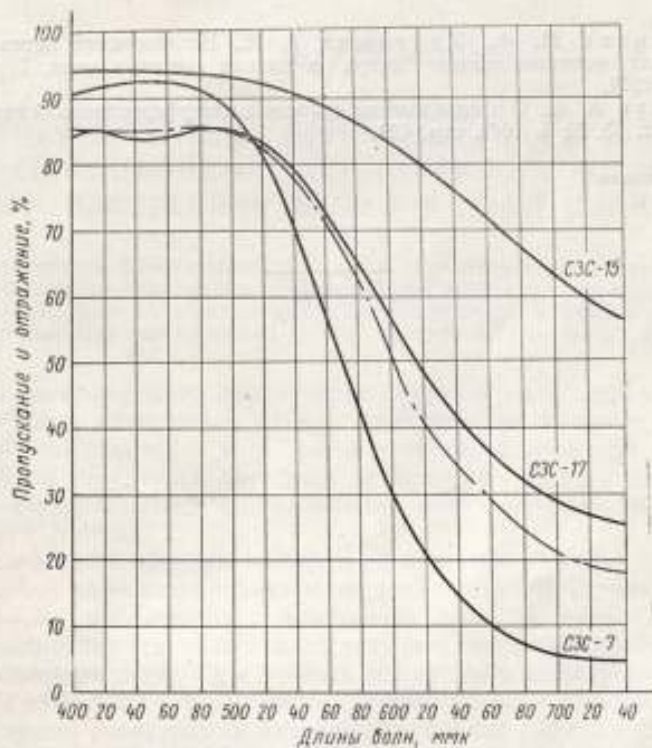


Рис. 2. Кривые спектрального пропускания в видимой области для светофильтров, применявшихся в работе:

— расчетная кривая спектрального пропускания светофильтра.

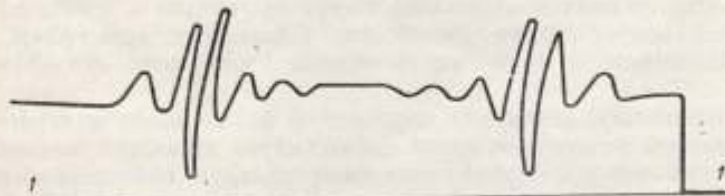


Рис. 3. Распределение интенсивности в интерференционной картине при регистрации с помощью ФЭУ-22 со светофильтром СЗС-17 толщиной 31 мкм.

Линия I-I соответствует темновому току.

Выводы

1. «Видимость» ахроматической полосы можно значительно улучшить подбором источника света, светофильтра и фотоэлемента.
2. Отличие сигнала, соответствующего ахроматической полосе, от других полос позволяет выделить его обыкновенными методами электроники.
3. Применение фотоэлементов, чувствительность которых охватывает весь спектральный интервал пропускания оптических стекол, должно еще более увеличить «видимость» ахроматической полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф., Карташев А. И., Исследование интерференционной установки для воспроизведения метра в длинах световых волн, Труды ВНИИМ, вып. 7(67), 1949.
2. Гершун А. А., О распределении яркости в интерференционной картине в белом свете, ДАН, т. 53, № 5, 1946, стр. 429.

Поступила в редакцию
28/XII 1959 г.

Н. Р. БАТАРЧУКОВА, Ю. П. ЕФРЕМОВ
ВНИИМ

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КОЛЕЦ РАВНОГО НАКЛОНА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДЛИНЫ И ДЛИН ВОЛН

В статье изложен фотоэлектрический метод регистрации интерференционных полос равного наклона, примененный во ВНИИМ при измерениях концевых мер на большом горизонтальном интерферометре, а также приведен обзор методов объективной оценки дробных частей порядков интерференции.

Явления интерференции света широко применяются как в метрологии при высокоточных измерениях длины, определениях качества поверхностей, качества плоскостей и т. п., так и в спектроскопии при исследовании сверхтонкой структуры, определении контуров спектральных линий, измерениях интенсивностей составляющих при спектральных анализах изотопического состава.

При этом весьма важным является правильное решение задачи, как в данном случае зарегистрировать интерференционную картину.

Визуальные наблюдения, возможные лишь в видимой области спектра, ограничиваются также недостаточной чувствительностью глаза к слабым освещенностям. При точных измерениях наблюдатель вносит в результаты заметные субъективные систематические ошибки.

Долгое время регистрация интерференционной картины осуществлялась с помощью фотографии, расширившей восприятие по спектру. Основным преимуществом фотографии является возможность сохранения подлинной картины эксперимента в течение длительного времени. Однако трудоемкость процесса обработки снимков, недостаточная чувствительность имеющихся в настоящее время фотослоев к некоторым областям спектра, требующая длительных экспозиций, недостаточная разрешающая способность этих слоев вносят затруднение в применение фотографии.

С развитием объективной фотометрии появились приемники, весьма чувствительные к области очень слабых потоков лучистой энергии. Наличие таких приемников сделало реальным переход к фотоэлектрическим методам регистрации интерференционной картины.

В зависимости от цели применения явлений интерференции света фотоэлектрическая регистрация может быть сведена либо к непосредственной записи интерференционных максимумов, либо к счету числа интерференционных полос.

Целью настоящей работы является исследование применения фотоэлектрической регистрации интерференционных колец равного наклона при измерениях длины трубчатых эталонов типа Фабри-Перо.

Первые попытки фотоэлектрической регистрации полос равного наклона были осуществлены при исследованиях сверхтонкой структуры с помощью многолучевого интерферометра.

В 1948 г. почти одновременно появились две работы.

Первая [1] предусматривала создание фотоэлектрического фотометра для слабых световых потоков, одним из применений которого может быть регистрация сверхтонкой структуры спектральных линий. В ней весьма подробно рассмотрены различные схемы фотоэлементов с усилителями для приема слабых световых потоков, а также исследованы отечественные фотоумножители. В качестве примера приведено описание регистрации сверхтонкой структуры зеленой линии ртути с помощью фотометра с оксидноцинковой трубкой Кубецкого. Прибором высокой разрешающей силы служил эталон Фабри-Перо с диафрагмой в виде полукольца. Перемещение интерференционных максимумов перед фотокатодом производилось путем плавного изменения оптической разности хода в интерферометре.

Во второй работе [2] рассмотрен «фотоэлектрический интерферометр Фабри-Перо», причем внимание авторов обращено главным образом на оптическую часть схемы.

В 1947 г. во ВНИИМ интерферометр Фабри-Перо был использован для монохроматизации спектральных линий [3]. Интерференционная картина полос равного наклона проектировалась на металлическую или фотографическим способом изготовленную маску. Кольцевые прорезы маски или круглое отверстие в ее центре играли роль выходной щели интерференционного монохроматора. Изменения положения максимума интерференции, отвечающего данной длине волны, достигались путем небольших колебаний температуры интерферометра, если он представлял собой плоскопараллельную пластинку из кварца или стекла, или путем изменения давления воздуха, если интерферометром служила воздушная плоскопараллельная пластинка.

На рис. 1 изображен внешний вид дисперсионной системы интерференционного монохроматора, предназначенной для выделения составляющих сверхтонкой структуры зеленой линии ртути [4]. Луч света от источника 1 (ртутной дуги) направляется конденсором 2 через фильтр 3 на помещенную в герметически закрывающейся камере 4 плоскопараллельную воздушную пластину. Интерференционная картина от пластинки, толщина которой рассчитывается так, чтобы полностью разрешалась составляющая сверхтонкой структуры, подлежащая выделению, проектируется объективом 5 в плоскость маски 6 с круглым отверстием в центре. Камера 4 соединена резиновым шлангом с насосом 9 и манометром 8. Насос 9 позволяет плавно уменьшать или увеличивать давление внутри камеры. Окуляр 7 служит для визуального наблюдения монохроматизированного излучения и может быть заменен фотоэлектрическим приемником.

Схема интерференционного монохроматора [3, 4] была использована для создания интерферометра Фабри-Перо с фотоэлектрической регистрацией, с той лишь разницей, что в этом случае [1, 2] луч света из отверстия маски направлялся не на интерференционный прибор, анализирующий излучение, а на фотоэлемент или фотоумножитель с усилителем, на выходе которого устанавливается регистрирующий прибор — гальванометр или самописец.

Одним из важных моментов при фотоэлектрической регистрации является способ изменения порядка интерференции перед диафрагмой фотоприемника — сканирование. Его можно осуществить либо перемещением прямоугольной щели вместе с фотоприемником вдоль диаметра колец, либо перемещением проектирующего объектива, либо одного из

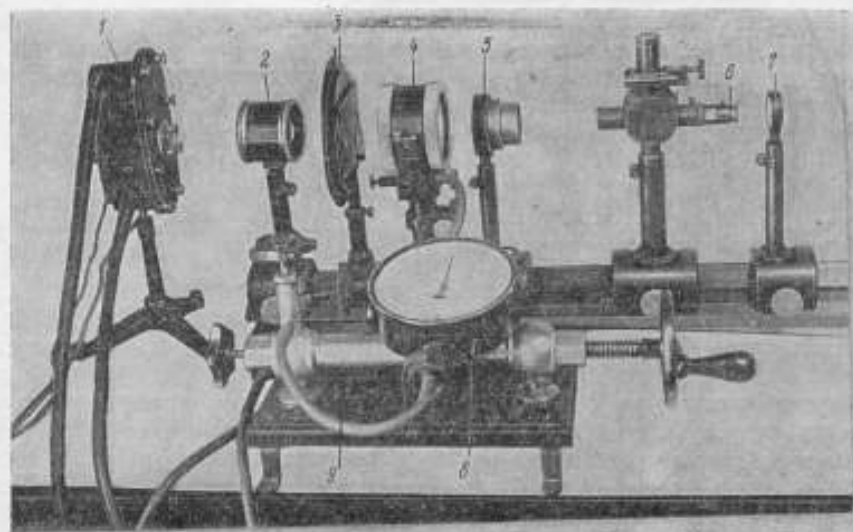


Рис. 1. Внешний вид дисперсионной системы интерференционного монохроматора.

зеркал интерферометра. Подробное исследование этого вопроса показало, что наиболее простой и удобной является схема интерференционного монохроматора со сканированием путем изменения давления воздуха между зеркалами эталона Фабри-Перо [5, 6].

Способ количественной оценки дробных частей порядков интерференции при фотоэлектрической регистрации колец равного наклона

Наиболее простым из объективных методов определения дробной части порядка интерференции является метод, предложенный Бер-

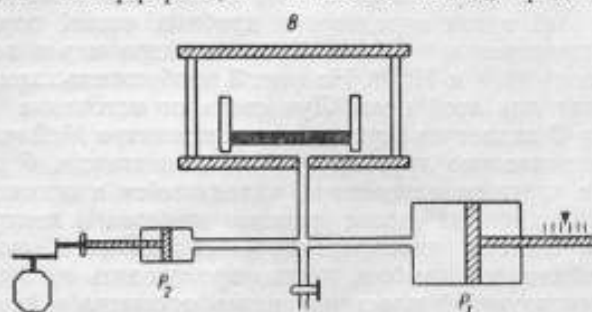


Рис. 2. Оптическая схема метода Берда.

дом [7], [8]. Оптическая схема этого метода совершенно подобна схемам, применяемым для фотоэлектрической записи интерференционных полос равного наклона, с той лишь разницей, что камера *B* интерференционного эталона соединена с двумя насосами P_1 и P_2 (рис. 2). Поршень насоса

P_2 совершает колебательное движение 5-10 раз в секунду и меняет разность хода в эталоне периодически на $\pm \frac{\lambda}{6}$ с той же частотой. Если максимум интерференции приходится как раз в центре диафрагмы, то колебания яркости пятна делаются почти незаметными для глаза. Таким образом обеспечивается фиксация максимума.

Поршень насоса P_1 снабжен шкалой, отградуированной в единицах давления. Изменяя давление в камере, можно точно отметить два значения давлений (больше и меньше атмосферного), отвечающих двум соседним максимумам, так что $p_1 < p < p_2$; тогда дробная часть z для атмосферного давления p будет

$$z = \frac{p - p_1}{p_2 - p_1}.$$

Рэнк и Беннет [9] воспользовались аналогичным методом для определения длин волн инфракрасной области спектра в вакууме с помощью многолучевого интерферометра. По их методу вакуумная камера с эталоном Фабри-Перо соединена через трехходовой кран с насосом, баллоном, содержащим сухой, лишенный углекислоты воздух, и с открытым коленом U-образного ртутного манометра. По положениям уровней ртути в коленях манометра определяется давление внутри камеры и эталона. Предварительно, перед началом измерений, в эталоне и камере создают вакуум, а затем через капилляр со скоростью 1,3 мм рт. ст. в минуту напускают из баллона сухой воздух. Затем заранее с помощью неподвижных нитей отмечают два положения уровней ртути в манометре, близких и симметрично расположенных по отношению к первому появляющемуся максимуму интерференции. В моменты прохождения уровнями фиксированных положений на регистрирующей ленте делают отметки. По этим отметкам, зная давление в фиксированных положениях уровней манометра, можно весьма точно получить значение давления p для интерференционного максимума.

По известному коэффициенту преломления воздуха легко вычислить для каждой длины волны разность давлений Δp , изменяющую порядок интерференции на единицу, и тогда дробная часть для вакуума будет

$$z = 1 - \frac{p}{\Delta p}.$$

Точность определения дробной части порядка интерференции этим методом, как указывается в работе [9], составляла 0,003 полосы.

Объективный метод определения дробных частей порядка интерференции был применен и в Международном бюро мер и весов при сравнении длин волн Kr^{86} и Hg^{108} . На рис. 3 изображена схема Терьева [10], использованная для этой цели. Луч света от источника 1 или 2 через монохроматор 3 падает на зеркала интерферометра Майкельсона 4, установленные параллельно друг другу. Фотоумножитель 6 расположен за диафрагмой с круглым отверстием, находящейся в плоскости локализации интерференционных полос равного наклона и центрированной по отношению к системе интерференционных колец. С помощью механизма 5, снабженного лимбом, можно производить медленный плавный наклон компенсирующей пластинки интерферометра и тем самым изменять разность хода. На выходе усилителя 7 установлен регистрирующий прибор 8. При наклоне компенсирующей пластинки фототок проходит через максимум и минимум. Отметив по лимбу положения компенсирующей пластинки, отвечающие интенсивностям, близким 0,5 ($I_{\max} + I_{\min}$), определяют интерполяцией точное значение положения компенсирующей пластинки для максимума или минимума. Зная начальное положение

компенсирующей пластинки, можно определить дробные части порядка интерференции для всех сравниваемых длин волн.

Метод количественной оценки дробной части порядка интерференции, примененный в настоящей работе для измерения длины трубчатого эталона Фабри-Перо на большом горизонтальном интерферометре

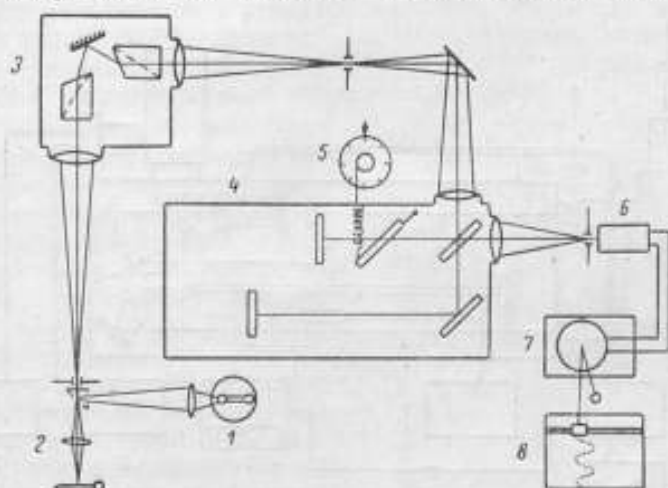


Рис. 3. Схема Терьена.

ВНИИМ, предложен одним из авторов настоящего исследования и подробно изложен в его статьях [11, 12]. По этому методу определение дробной части порядка интерференции сводится к простым линейным измерениям на регистрограмме.

Исследование трубчатого эталона большого горизонтального интерферометра с применением фотоэлектрической регистрации интерференционных колец равного наклона

На рис. 4 изображена схема большого горизонтального интерферометра с включенными в нее частями схемы фотоэлектрической регистрации интерференционных полос для измерения длины трубчатого эталона. Луч света от монохроматического источника — кадмиевой лампы 1 с накалированными электродами с Cd^{114} — направляется конденсором на щель монохроматора 2, выделяющего спектральные линии, и параллельным пучком падает на трубчатый эталон 4, соединенный посредством трубки 3 с микроманометром 10. Отражаясь зеркалом в объектив камеры 5, он попадает на катод фотоумножительной трубки 6. Каскад усиления 8, собранный по схеме катодного повторителя, позволяет подавать разность потенциалов с высокоомного выхода фотоумножителя на низкоомный вход самописца 9 типа ПС1-02 или ЭПП-09. Блок питания 7 обеспечивает стабилизированное напряжение 930–1200 в для фотоумножителя, а также 6,3 в и 200–250 в для питания каскада 8. Датчик давления состоит из пульсатора 11, увеличивающего или уменьшающего давление на 3–4 порядка интерференции от атмосферного, и микроманометра 10, служащего в схеме большого горизонтального интерферометра для отсчета изменений давления внутри трубчатого эталона при сравнении длины меры с его длиной.

Отметка давления подавалась на вход самописца резким коротким замыканием ключа в момент прохождения светового указателя микрома-

номера через нуль шкалы. Скорость перемещения поршня пульсатора 1 рассчитана так, чтобы обеспечивать запись трех или четырех интерференционных максимумов при изменении давления в ту или в другую сторону.

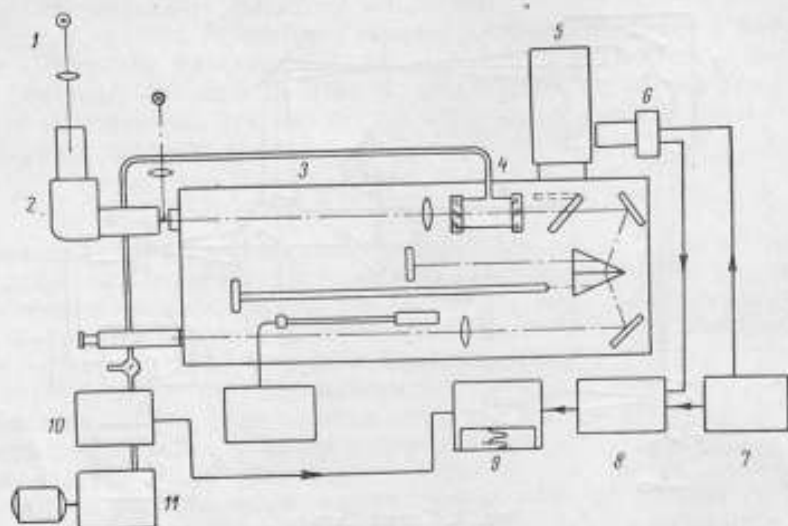


Рис. 4. Схема большого горизонтального интерферометра.

На рис. 5 показан внешний вид насоса; здесь можно видеть электромотор 10, выключатель 9, редуктор 1, переключатель скорости 2, палец штока поршня насоса 6, корпус насоса 8, стержень 3, 5, соединенный с переключателем, хомуты 4 и 7, закрепленные на стержне 3. Во время

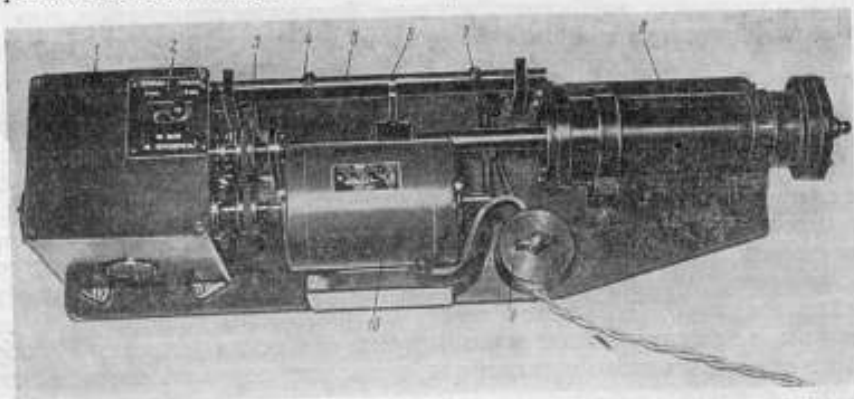


Рис. 5. Внешний вид насоса-пульсатора.

работы пульсатора палец штока поршня 6 доходит до одного из хомутов 4 или 7 и увлекает их вместе со стержнем 3. Движение продолжается еще некоторое время, затем происходит переключение двух фаз и поршень начинает двигаться в обратном направлении. Закрепляя хомуты в тех или иных местах стержня 3, можно автоматически регулировать степень изменения давления воздуха в эталоне. Перед началом записи с помощью пульсатора давление уменьшают или увеличивают на несколько порядков интерференции от атмосферного. После автоматиче-

ского переключения мотора пульсатора давление в эталоне начнет меняться в обратную сторону, и с этого момента производят запись интерференционных максимумов.

Применение фотоумножителя ФЭУ-19М с малым темновым током, тщательная изоляция подводных проводов, стабилизация напряжения питания фотоумножителя и усилительных схем обеспечили возможность получения вполне удовлетворительных регистрограмм интерференционных колец в зеленой, голубой и синей линиях Cd^{114} . На рис. 6 приведена одна из регистрограмм зеленой линии спектра Cd^{114} .

При фотоэлектрической регистрации вследствие конечного размера отверстия диафрагмы, выделяющей центральное пятно в интерференционной картине, регистрируемый максимум всегда как бы сдвинут в сторону больших давлений, т. е. в сторону больших порядков интерференции. Поэтому в значение δ следует вводить некоторую положительную поправку. Происхождение этой поправки такое же, как и поправки на ширину источника света, вводимой при измерениях концевых мер на интерферометрах типа Кестерса [13]. Теория этого явления более подробно была разобрана несколько позднее [9, 14, 15]. В этих работах было установлено, что в случае применения круглой диафрагмы, выделяющей некоторую часть Δ центрального максимума, поправка δ_s при регистрации симметричных интерференционных полос равна точно половине Δ :

$$\delta_s = 0,5\Delta$$

для всех значений $0 < \Delta < 1$. Величина Δ для круглого отверстия радиуса r подсчитывается по формуле

$$\Delta = \frac{\pi n d r^2}{\lambda f^2},$$

где nd — оптическая толщина эталона;

λ — длина волны;

f — фокусное расстояние проектирующего объектива.

Входное отверстие большого горизонтального интерферометра представляет собой квадрат.

Для квадратного отверстия поправка δ_s по экспериментальным данным, приведенным в работе [9], равна поправке для круглого отверстия, вписанного в данный квадрат. Однако приближенный теоретический подсчет и эксперименты, проведенные одним из авторов настоящей статьи, показали, что для квадратного отверстия поправка δ_s больше $0,5\Delta$ и равна $0,64\Delta$ [16].

При измерениях длины такая поправка должна быть введена обязательно. Что же касается измерения длин волн, то введение поправки при неизменных размерах диафрагмы оказывается излишним, так как она

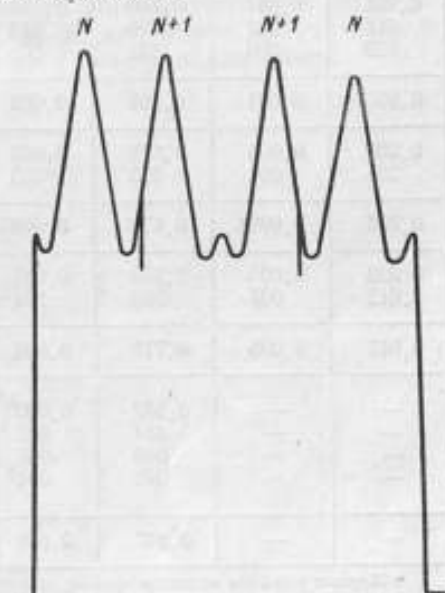


Рис. 6. Регистрограмма в зеленой линии спектра Cd^{114} .

при умножении порядка интерференции на отношение длин волн делается постоянной и одинаковой для обеих сравниваемых линий.

Таблица 1

$\lambda = 5649\text{Å}$		$\lambda = 5870\text{Å}$		$\lambda = 5649\text{Å}$		$\lambda = 5870\text{Å}$	
ϵ	$ z_{\text{ср}} - z $	ϵ	$ z_{\text{ср}} - z $	ϵ	$ z_{\text{ср}} - z $	ϵ	$ z_{\text{ср}} - z $
0,921	0,001	0,400	0,008	—	—	0,419	0,008
918	002	390	002	—	—*	402	009
920	000	387	005	—	—	0,411	0,0085
0,920*	0,001	0,392	0,005	—	—	0,395	0,009
0,266	0,000	0,678	0,003	—	—	414	010
265	001	673	002	—	—	0,404	0,009
0,266	0,0005	0,675	0,0025	—	—	0,224	0,006
0,022	0,005	0,715	0,003	—	—	222	004
0,012	005	709	003	—	—	208	010
0,017	0,005	0,712	0,003	—	—	0,218	0,006
—	—	0,047	0,000	—	—	0,164	0,001
—	—	054	007	—	—	168	003
—	—	040	007	—	—	163	002
—	—	048	001	—	—	0,165	0,002
—	—	0,047	0,004	$\pm 0,002$		$\pm 0,005$	

* Жирным шрифтом выделены средние значения.

С целью выяснения повторяемости результатов при фотоэлектрической записи было произведено измерение дробной части порядка интерференции при одной и той же разности хода повторно 2—3 раза для одной и той же линии криптона.

Таблица 2

$\lambda, \text{Å}$	$ \lambda_{\text{ср}} - \lambda , \text{Å}$
5870,9148	0,0002
41	5
44	2
46	0
46	0
48	2
48	2
Среднее $5870,9146 \pm 9 \cdot 10^{-5} \text{Å}$	

измерений длины волны желтой линии Kr^{86} в источнике света с накаленными электродами при температуре стенок капилляра источника света,

Результаты этих определений для желто-зеленой и желтой линии Kr^{86} приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, дробная часть порядка интерференции для обеих линий воспроизводится до 0,002—0,005 интерференционной полосы. Следует обратить внимание, что для желто-зеленой линии Kr^{86} воспроизводимость дробных частей несколько выше, чем для желтой. Это объясняется качеством линии.

Судить о точности воспроизведения дробной части порядка интерференции при измерениях на установке с фотоэлектрической регистрацией можно также по точности воспроизведения длины волны какой-либо спектральной линии. В табл. 2 приведены в качестве примера результаты измерений

соответствующей температуре кипения азота, при разности хода в интерферометре 200 мкм.

Основное преимущество фотоэлектрического метода определения дробных частей порядка интерференции по сравнению с фотографическим заключается в несомненном выигрыше во времени. Если при фотографической регистрации только на получение интерферограммы в одной линии затрачивается 10 мин, а затем на обработку, измерение диаметров колец (даже с применением фотоэлектрического компаратора, сильно сокращающего время измерений диаметров), подсчет дробной части необходимо еще приблизительно около 1 ч, то при фотоэлектрической регистрации при хорошо настроенной схеме за 15—20 мин можно получить дробные части порядка интерференции для 3—4 спектральных линий.

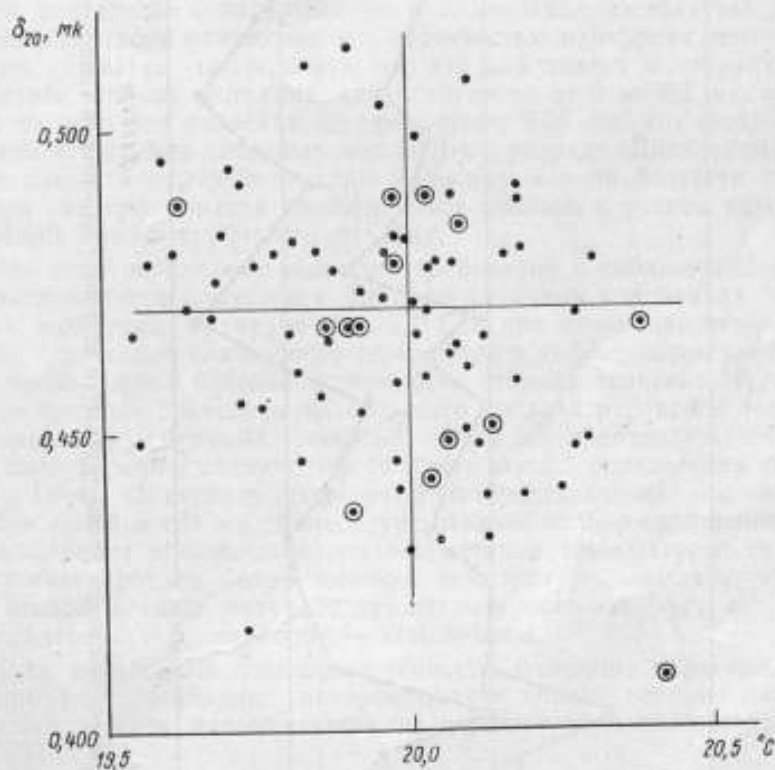


Рис. 7. Зависимость значения δ_{20} от температуры эталона.

Полное совпадение результатов сравнения длины трубчатого эталона, полученных при фотографической и фотоэлектрической регистрациях, показало, что фотоэлектрическая регистрация не вносит дополнительных систематических погрешностей при определении длины по кольцам равного наклона (на рис. 7 точки, обведенные кружками, соответствуют фотоэлектрической регистрации, а остальные — фотографической).

Использование фотоэлектрической регистрации дало возможность проследить в течение нескольких месяцев за длиной стального трубчатого эталона № 1 от большого горизонтального интерферометра.

На рис. 8 приведены графики результатов измерения: *a* — длины эталона в ноябре — декабре 1957 г., *b* — отклонение температуры эталона от 20° С за этот же период.

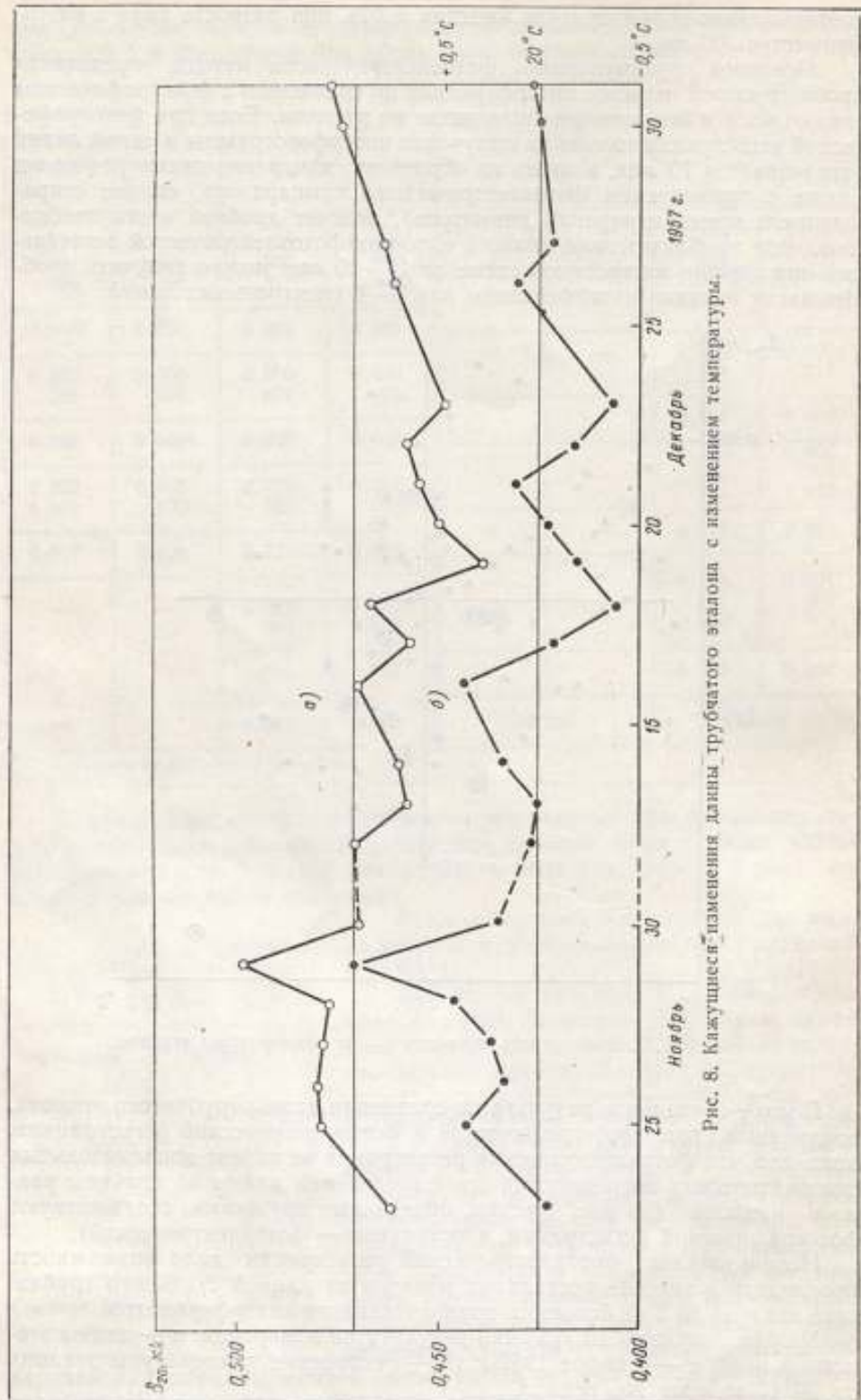


Рис. 8. Кладущиеся изменения даны трубчатого эталона с изменением температуры.

Некоторая повторяемость в ходе этих двух графиков несомненно наблюдается. Казалось бы, такое повторение легче всего объяснить неправильным значением коэффициента термического удлинения α трубы эталона. Однако попытки уменьшить разброс значений δ_{20} изменением значения α не привели к желаемому результату. На рис. 7 приведена поправка δ_{20} , полученная в результате 82 измерений при температурах эталона 19,5—20,5° С. Отсутствии какого-либо закона в разбросе точек указывает на то, что никакой зависимости между приведенной к 20° С длиной трубчатого эталона и его измеренной температурой нет. Совершенно очевидно, что упомянутое выше изменение длины трубчатого эталона с течением времени не представляет собой действительного механического изменения его длины, а является лишь кажущимся изменением, связанным с нарушениями в соблюдении постоянства режима термоконстантного помещения и с неточностью измерения температуры эталона. Следует подчеркнуть, что эти кажущиеся изменения длины трубчатого эталона укладываются в интервал от 0 до 0,1 мк, и отклонения от среднего значения не превышают 0,05 мк, что соответствует точности аттестации концевых мер по 1-му разряду. Дальнейшее повышение точности измерения длины концевых мер на большом горизонтальном интерферометре должно быть связано с учетом кажущихся изменений длины трубчатого эталона.

При этом необходимо повысить требования к соблюдению режима термоконстантного помещения. Так, при суточных колебаниях температуры в термостате примерно 0,1÷0,2° С и при измерении температуры эталона с помощью платинового термометра и дифференциальной термопары на наружной боковой поверхности эталона значение δ_{20} совпадает со средним значением из большого числа измерений с точностью до нескольких тысячных микрона. Если же производить измерения в худших условиях, следует пересмотреть способ определения температуры эталона. Объяснить полученный разброс значений δ_{20} , измеренных при одной и той же температуре, можно, только предположив, что если измерения производили при возрастании температуры, то термопара регистрировала более высокую температуру, чем действительно имел эталон, и тогда получали заниженное значение δ_{20} , а при убывании температуры, наоборот, — завышенное.

Итак, дальнейшее повышение точности измерения концевых мер на большом горизонтальном интерферометре вполне реально лишь при уточнении методов термостатирования и регистрации температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ошеревич А. Л., Павлова Е. Н., Родионов С. Ф., Фишкова Л. М., О фотоэлектрической фотометрии малых световых потоков, ЖТФ, т. 19, 1949, стр. 184.
2. Jacquinet P., Dufour Ch., «Journ. Rech. CNRS», v. 6, 1948, p. 91.
3. Батарчукова Н. Р., Оптический метод получения строго монохроматического излучения, ДАН СССР, т. VIII, вып. 6, 1947, стр. 1013.
4. Батарчукова Н. Р., Интерференционный монохроматор, Труды ВНИИМ, вып. 7(67), 1949.
5. Biondi M. A., «Rev. Scient. Instr.», v. 27, issue 1, 1956, p. 36—39.
6. Калитеевский Н. И., Чайка М. П., Оптические схемы для исследования сверхтонкой структуры спектральных линий фотоэлектрическим методом, Вестник ЛГУ, № 4, серия физико-химическая, вып. 1, 1956, стр. 9.
7. Baird K. M., «JOSA», v. 44, 1954, p. 11.
8. Baird K. M., Smith D. S., «Can. Journ. Phys.», v. 35, 1957, p. 455.
9. Rank D. H., Bennet J. M., Bennet H. E., «JOSA», v. 46, 1956, p. 477.
10. Terrien M. J., Comptes-Rendus, v. 246, 1958, p. 2362.

11. Ефремов Ю. П., Применение фотоэлектрической регистрации интерференционных полос, «Измерительная техника», № 6, 1958, стр. 15.
12. Ефремов Ю. П., Измерение длин волн линий криптона-86 в инфракрасной области спектра, Труды ВНИИМ, вып. 40(100), 1959.
13. Игнатовский В. С., Влияние формы и положения источника света при измерениях интерференц-компаратором Кестерса, Стандартгиз, 1935.
14. Chabbal R., «Journ. Rech. CNRS», v. 24, 1953, p. 138.
15. Jaffe J. H., «JOSA», v. 43, 1953, p. 1171.
16. Ефремов Ю. П., Каневский Ю. П., О поправке на размер выходной диафрагмы при фотоэлектрической регистрации интерференционных полос равного наклона, «Оптика и спектроскопия», т. VIII, вып. 2, 1960, стр. 266.

Поступила в редакцию
28/XII 1960 г.

Е. А. ВОЛКОВА

ВНИИМ

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ КВАРЦЕВЫЕ ПЛАСТИНКИ

В статье изложены результаты исследования поляриметрических пластинок, изготовленных заводом КИП для поверки поляризационных приборов, а также даны рекомендации, необходимые для установления единства поляриметрических измерений в стране.

Для измерения вращательной способности сахара кварц начали применять еще более 100 лет тому назад, когда Солейлем в 1845 г. был изобретен кварцевый компенсатор. Близость значений вращательных дисперсий кварца и сахарных растворов позволила освещать сахариметры с кварцевым компенсатором источниками света с широким спектральным интервалом. Вследствие этого сахариметры нашли весьма широкое применение.

В 1896 г. Ландольт, основываясь на свойствах кварца (малая зависимость вращательной способности от температуры, неизменность его свойств во времени), применил кварцевые пластинки для поверки самих сахариметров, благодаря чему пластинки приобрели такое значение в мировой сахариметрии, что при последующих уточнениях шкалы сахариметров исследователи исходили не только из удельного вращения сахарозы, но и из возможности воспроизведения угла вращения с помощью кварцевой пластинки. Было также установлено числовое соотношение между сахарными и угловыми градусами.

На VIII заседании Международной комиссии по единым методам исследования сахара в 1932 г. была подтверждена необходимость поверки шкалы сахариметра кварцевыми пластинками и вынесено решение о принятии конструкции пластинок и их оправ, предложенной Шоуроком.

В соответствии с решением этой Комиссии [1] пластинки и их оправы должны отвечать следующим требованиям:

1) пластинки должны быть изготовлены из оптически однородного кварца, с полной однородностью последнего в центральной зоне пластинки диаметром не менее 9 мм;

2) пластинки следует вырезать из кварца так, чтобы их поверхности были перпендикулярны оптической оси кристалла; отступления допускаются не более 10'.

Пластинки должны быть плоскопараллельными, с радиусом кривизны поверхностей не менее 50 м и с углом клина не более 20' (что составляет при диаметре пластины 16 мм разность толщин, равную 1,6 мк);

3) каждая пластинка должна быть укреплена в почерненной изнутри оправе, ввинчивающейся в направляющую трубку (рис. 1). Пластинка должна свободно перемещаться вдоль оси трубки не более чем на 0,1 мм, что достигается подшлифовкой буртика, удерживающего пластинку. Диаметр внутренней кольцевой выточки оправы для пластинки должен превышать диаметр пластинки не более чем на 0,5 мм (передвижение пластинки в ее плоскости на 1 мм при наличии клина 20° вызывает изменение угла вращения плоскости поляризации на 0,002°);



Рис. 1. Пластинка в оправе с направляющей трубкой.

4) измерение угла вращения плоскости поляризации должно производиться при 20°С в дуговых градусах при применении монохроматического света с длинами волн $\lambda = 0,58925 \text{ мк}$ или $\lambda = 0,5461 \text{ мк}$, излучаемого натриевой или ртутной лампой соответственно. Согласно Международному соглашению,

$$100^\circ\text{S}^* = 34,620^\circ \text{ при } \lambda = 0,58925 [1]**;$$

5) на поверхности пластинки (сбоку, вне светового диаметра) должна быть гравировка с указанием года ее выпуска, названия учреждения-изготовителя и номера пластинки.

6) пластинки с номинальными углами вращения менее 24° S ($\approx 8^\circ$) должны изготавливаться из двух пластинок кварца — правовращающего и левовращающего — общей толщиной не более 1,6 мм. Толщины пластинок рассчитаны таким образом, что угол вращения плоскости поляризации комплекта равен разности углов вращения обеих пластинок.

Последнее, IX заседание Международной комиссии рекомендовало национальным институтам разных стран для поддержания международной сахарной шкалы периодически сличать результаты измерений углов вращения плоскости поляризации пластинок.

Таким образом, поляриметрические пластинки, изготовленные в соответствии с вышеприведенными требованиями, могут служить в качестве надежных и удобных мер угла вращения плоскости поляризации. С их помощью следует производить поверку поляриметрических приборов.

Методы испытания пластинок

Изготовленные поляриметрические пластинки исследуют на однородность кварца. Кроме того, должны быть определены отступления поверхностей пластины от плоскости и измерены клиновидность пластины и угол ориентировки поверхностей по отношению к оптической оси кварца.

Для исследования однородности кварца применяют поляриметр. При этом пластинку устанавливают на прибор и, вращая анализатор, получают полное затемнение поля зрения. Если при вращении пла-

* Международный сахарный градус обозначается °S.

** При измерении углов вращения плоскости поляризации кварцевых пластинок в зеленой линии ртути, в Национальном Бюро стандартов Америки [2] значение угла вращения для желтой линии вычисляют умножением полученного значения на переводный коэффициент, равный 0,85085.

стилки в ее плоскости не видно изменений в освещении поля зрения, то кварц пластинки однороден.

Плоскости пластинок и их плоскопараллельность исследуют с помощью интерферометра [3].

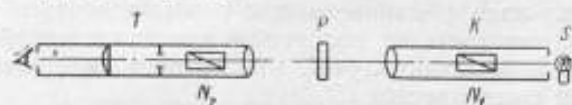


Рис. 2. Схема интерферометра.

Для определения правильности ориентировки оптической оси кварца по отношению к плоскости кварцевых пластинок лучше всего использовать интерферометр, созданный для этой цели Шонроком [4]. Схема и общий вид интерферометра приведены на рис. 2 и 3. Испытуемую кварцевую пластинку *P* притирают при помощи глицерина на специальное вертикальное плоское стекло, установленное на столике, рас-

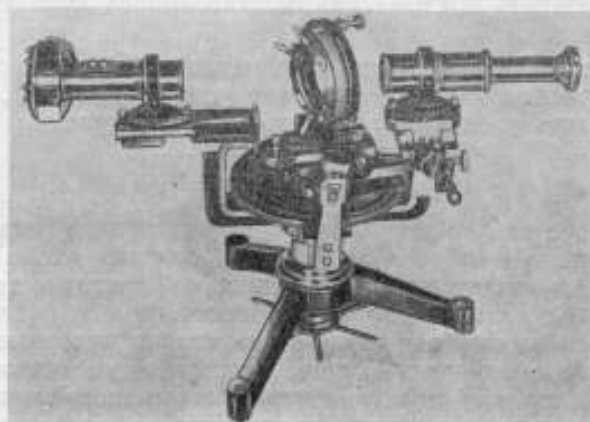


Рис. 3. Общий вид интерферометра.

положенном в центре горизонтального лимба с двумя нониусами; на пластинку падает плоскополяризованный монохроматический свет от лампы *S*, проходящий через щель коллиматора *K* и поляризационную призму *N*₁. При наклонном положении пластинки к оси коллиматора (в горизонтальной плоскости) можно наблюдать вертикальные интерференционные полосы при помощи зрительной трубы *T* с поляризационной призмой *N*₂. Перед измерением на приборе, не вставляя кварцевой пластинки, добиваются при помощи соответствующих юстировочных винтов совмещения автоколлимационного изображения щели коллиматора от поверхности стеклянной пластины с самой щелью, а затем — совмещения щели с перекрестием нитей зрительной трубы. После этого отсчитывают по лимбу угол, соответствующий перпендикулярному положению плоской пластины к оптической оси коллиматора.

При вращении стеклянной пластины вместе с испытуемой кварцевой относительно вертикальной оси через поле зрения зрительной трубы проходит несколько вертикальных интерференционных темных полос. Одну из интерференционных полос, которая попадает в поле зрения при повороте стеклянной пластины по отношению к первому ее положению (когда ее плоскости были перпендикулярны оси коллиматора) на угол, близкий к 40° (угол, обозначенный в нижеприведенной формуле

буквой φ), совмещают с перекрестием зрительной трубы. Наблюдая в зрительную трубу, вращают стеклянную пластину в ее плоскости. Если оптическая ось кварца не перпендикулярна поверхностям пластинки, то при вращении последней в ее плоскости ось будет описывать конус. Разность хода обыкновенных и необыкновенных лучей будет изменяться в зависимости от положения кристаллической оси по отношению к падающему пучку лучей, что вызовет смещение интерференционной полосы с перекрестия [5].

Поворотом зрительной трубы с помощью микрометрического винта с барабаном возвращают интерференционную полосу на нить и отмечают максимальный (φ_1) и минимальный (φ_2) углы поворота трубы.

Величину угла отступления оптической оси от перпендикулярности к поверхностям пластинки [3] можно вычислить по формуле

$$\nu = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \cos \varphi (2n_0^2 - \sin^2 \varphi)}{(n_0^2 - \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

где n_0 — показатель преломления обыкновенного луча кварцевой пластинки.

При освещении интерферометра натриевой лампой со светофильтром и при ориентировочной установке угла φ около 40° , вполне достаточно вычислить угол ν по приближенной формуле

$$\nu = 0,3(\varphi_1 - \varphi_2).$$

На приборе можно получить точность порядка нескольких минут при измерении углов φ_1 и φ_2 с погрешностью около $10''$. Если все характеристики пластинки подтвердили ее пригодность, приступают к измерению ее вращательной способности.

С этой целью ее устанавливают на столик поляриметра и, наблюдая в автоколлимационный окуляр, с помощью регулировочных винтов установочного столика совмещают крест и его изображение в поле зрения прибора. Затем производят установки на полутеневое равенство полей сравнения при освещении поля зрения прибора натриевой лампой со светофильтром.

Если поляриметр имеет устройство для изменения угла полутени, то необходимо при измерении угла вращения кварцевой пластинки выбрать оптимальную величину угла полутени, исходя из того, что погрешность установки полутеневого равенства полей сравнения [6] выражается формулой

$$\Delta\alpha = \pm \frac{\varphi \Delta E}{4E},$$

где E — освещенность поля зрения прибора;

ΔE — наименьшая разность освещенностей полей сравнения, которую может заметить глаз при установке полутеневого равенства;

2φ — угол полутени, т. е. угол между плоскостями колебаний света, проходящего через две половины поля зрения.

У тренированных наблюдателей при хороших приборах $\frac{\Delta E}{E} = 1/50$ и тогда $\Delta\alpha = \pm \frac{\varphi}{200}$. Следовательно, для получения высокой точности

* Согласно указаниям Шопрока (Физический словарь, т. 4, 1938, стр. 287) величина $\frac{\Delta E}{E}$ может достигать 0,6%, тогда $\Delta\alpha = 0,0015^\circ$.

следует производить измерения при возможно меньшем угле полутени. Уменьшение угла полутени приводит к малой освещенности поля зрения и к снижению чувствительности глаза. Даже наиболее яркий источник света позволяет использовать углы полутени не меньше чем $1,5-2^\circ$. В этом случае погрешность одной установки будет составлять около $0,004^\circ$.

Исследования пластинок во ВНИИМ

Во ВНИИМ были выполнены исследования ряда пластинок отечественного производства и зарубежных.

Для исследования качества изготовления пластинок применяли указанные выше приборы, для измерения угла вращения плоскости поляризации использовали поляриметр фирмы Шмидт и Генш с ценой деления окулярного микрометра $0,001^\circ$ и устройством для изменения угла полутени. Источником света служила натриевая лампа с накаливаемыми электродами и с желтым светофильтром, выделяющим дублет натрия.

Измерения проводили при постоянной температуре $20 \pm 3^\circ$ и для каждой пластинки выполняли отсчет температуры по термометру, расположенному на столике поляриметра. Приведение значения угла вращения плоскости поляризации к 20°C [1] производили по формуле

$$\beta_{20} = \frac{\beta_t}{1 + 0,000144(t - 20)},$$

где β_{20} и β_t — углы вращения при температуре 20°C и t соответственно; t — температура измерения.

Предварительно лимб поляриметра был подвергнут исследованию, которое показало, что его систематические ошибки составляют $2+4''$ и только на одном участке доходят до $6''$. Исследование производили методом, использованным ранее для изучения лимба гониометра [7]. На столике, связанном с лимбом поляриметра, была укреплена призма для измерения ее углов на разных участках исследуемого лимба автоколлимационным методом, аналогичным методу, применяемому при измерении углов на гониометре.

Большинство исследованных пластинок отечественного изготовления (свыше 150 шт.) имели диаметр 16 мм и предназначались для поверки сахариметров Киевского завода КИП; такой же величины были пластинки иностранных фирм (10 шт.); кроме того, были исследованы пластинки диаметром 12 мм для медицинских поляриметров П-161 (свыше 20 шт.).

Пластинки завода КИП имели конструкцию оправ и направляющих трубок, подобно изображенной на рис. 1. Однако качество выполнения оправ почти во всех случаях не соответствовало требованиям международного соглашения; некоторые пластинки нельзя было вынуть из оправ из-за плохого изготовления последних.

Из этой группы пластинок наиболее подробно были исследованы 50 штук, изготовленные заводом КИП в 1956—1957 гг. и не бывшие в применении до поверки. При этом, кроме указанных выше характеристик, для каждой пластинки был ориентировочно определен наибольший ее наклон, возможный вследствие свободы перемещения ее в оправе, к линии, соединяющей центры опорных колец направляющей трубки. Это измерение было выполнено для оценки величины вариаций угла вращения плоскости поляризации, передаваемого пластинками поверяемому прибору.

Установка пластинки на исследуемый прибор в конечном итоге определяется ориентировкой опорных колец по отношению к плоскости пластинки. Пластинку в оправе с направляющей трубкой располагали на столике поляриметра так, чтобы ее опорные кольца соприкасались с установочной призмой. Наблюдая в автоколлимационный окуляр и медленно поворачивая пластинку на опорных кольцах, замечали наибольший размах при движении центра отраженного перекрестия от поверхности пластинки в долях радиуса поля зрения; зная, что угловое поле зрения прибора составляет около $2^{\circ} 30'$, определяли указанную выше величину в минутах.

Измерения угла вращения плоскости поляризации производили только для тех пластинок, у которых отступления от плоскопараллельности не превосходили $1,5 \text{ мк}$, а погрешность ориентировки оптической оси кварца не превышала $30'$ (из всех 50 пластинок было забраковано только 4).

В табл. 1 приведены результаты исследования 50 пластинок Киевского завода КИП.

Таблица 1

Отступления от плоскости, мк	Количество пластинок	Отступления от параллельности, мк	Количество пластинок	Отступления от перпендикулярности оптической оси кварца к поверхностям пластинок	Количество пластинок	Наибольший угол дивг., соединяющий центры опорных колец направляющей трубки и нормаль к поверхности пластинки	Количество пластинок
От 0,1 до 0,2	43	До 0,5	31	До $10'$	20	До $10'$	18
Менее 0,3	7	. 1,5	18	. $30'$	27	. $20'$	20
Более 0,3	1	Более 3	1	Более $30'$	3	. $35'$	12
Допуск по международному соглашению							
0,6		1,6		$10'$		—	
Допуск по нашим расчетам							
0,3		0,2		$15'$		$30'$	

Сравнивая цифры, приведенные в табл. 1, с допусками на параметры, характеризующие пластинки по международному соглашению, можно сделать выводы, что согласно таблице большинство пластинок не удовлетворяет требованиям международного соглашения.

Поскольку вариации угла вращения плоскости поляризации, производимого пластинкой, зависят от суммы погрешностей изготовления пластинок и их оправ, то, несмотря на то, что не выдержаны отдельные величины допусков, установленные международным соглашением, пластинки не следует браковать. У рассматриваемой группы пластинок распределение допусков иное, чем это предложено международным соглашением; так например, измерения показали, что оправка с направляющей трубкой обеспечивает правильное положение пластинки в достаточно жестких пределах — нормаль к поверхности пластинки может изменять свое положение не более чем на $30'$. Поэтому судить о качестве пластинок можно было только после измерений углов вра-

щения плоскости поляризации на поляриметре и вычисления погрешности.

При измерениях пластинок КИП на поляриметре с углом полутени около 2° и при освещении прибора натриевой лампой с желтым светофильтром средняя величина средней квадратичной погрешности результата составляла около $0,006^\circ$ при 7 установках на полутеневое равенство полей сравнения. У пластинок различных иностранных фирм погрешности изготовления лежали в пределах, допустимых международным соглашением, но одна пластинка была забракована вследствие неоднородности кварца.

В этих пластинках погрешности расположения поверхностей по отношению к оптической оси не превосходили $5'$; отступления от плоскопараллельности у всех пластинок, кроме одной, были меньшими чем $0,5 \text{ мк}$, а отступления от плоскости почти у всех пластинок составляли $0,4 \text{ мк}$.

Измерения на поляриметре были выполнены при тех же условиях, что и измерения пластинок КИП. При этом была получена погрешность около $0,004^\circ$, т. е. несколько меньшая, чем для пластинок КИП.

На заводе КИП применяют технологию изготовления, согласно которой распределение допусков на различные характеристики пластинок, по-видимому, отличается от предложенного по международному соглашению. Однако точность передачи угла вращения плоскости поляризации близка к точности передачи угла вращения пластинками, изготовленными согласно международному соглашению. При несколько меньших допусках на одни характеристики пластинок и несколько больших — на другие, по сравнению с международными, технология изготовления, принятая заводом КИП, вероятно, обеспечит соответствующую точность их изготовления. Поэтому представляет интерес пересмотр величины допусков на отдельные параметры, характеризующие пластинки, с тем чтобы выбрать рациональное распределение допусков.

О допусках на изготовление пластинок

Как известно, погрешность образцового прибора не должна превышать погрешности поверяемого. Исходя из этого и предполагая, что погрешность сахариметра равна цене его наименьшего деления, т. е. $0,1^\circ \text{ S}$ или $0,034^\circ$, примем, что погрешность поляриметрических пластинок для поверки этих приборов должна быть $0,01^\circ$. Она складывается из двух: а) обусловленной неточностью измерения и б) неточностями изготовления пластинок. Последние возникают вследствие неточного изготовления самой пластинки, свободного перемещения ее в оправе, связанного с этим изменением оптического пути и положения пластинки при прохождении через нее света во время различных установок на поляриметре. Если $\frac{2}{3}$ погрешности $0,01^\circ$ положить на изготовление пластинок и $\frac{1}{3}$ — на их поверку, то согласно закону сложения дисперсий [8] допуск на изготовление составит около $0,007^\circ$, а допустимая погрешность измерения — $0,005^\circ$. Допуск на изготовление, в свою очередь, включает допуски на погрешности плоскостей, плоскопараллельности, ориентации плоскостей пластинок относительно оптической оси кварца и оправ пластинок.

Допустим, что плоскопараллельность пластины лежит в пределах $0,2 \text{ мк}$ и отступления от плоскости поверхностей составляют $0,3 \text{ мк}$, тогда возникнет погрешность в воспроизведении угла вращения плоскости поляризации, равная около $0,004^\circ$.

Допуски на ориентацию оптической оси кварца по отношению к поверхностям пластинок и на отклонение пластинки от перпендикулярности к оси проходящего пучка лучей находятся в некоторой зависимости друг от друга. Так, если через правильно изготовленную кварцевую пластинку толщиной 1 мм проходит пучок лучей, ось которого наклонена к нормали поверхности под углом 10° , то изменение вращательной способности в данном направлении по сравнению с нормальным [9] вызовет изменение угла поворота на величину $0,05^\circ$.

Наклон пластинки вызовет также увеличение оптического пути, проходящего светом в кварце, и, тем самым, изменит угол поворота на $0,32^\circ$. Кроме того, если поверхности пластинок не расположены перпендикулярно к оптической оси кварца, в поле зрения поляриметра появляется рассеянный свет, увеличивающий погрешность измерения. Следовательно, в рассматриваемом случае целесообразно установить допуск на отклонение от перпендикулярности поверхностей пластинок к оптической оси кварца около $15'$, а погрешность на наклон плоскостей пластинки около $30'$, что определяется суммой допусков на оправу и направляющую трубку пластинки. Тогда общая погрешность на изготовление пластинок составит заданную величину.

Таким образом, для примера нами рассмотрены допуски на образцовые пластинки, предназначенные для поверки сравнительно точного прибора. Если погрешность больше чем $0,01^\circ$, то соответственно можно увеличить и допуски на изготовление пластинок.

Однако выбор допусков следует делать исходя из того, что все характеристики пластинки взаимно связаны между собой.

Погрешности изготовления кварцевых пластинок и вызываемые ими изменения углов поворота плоскости поляризации, производимые пластинкой диаметром 16 мм, толщиной 1 мм при свете с длиной волны $0,589 \text{ мк}$, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение угла поворота, соответствующее только изменению толщины вследствие непараллельности		Изменение угла поворота только вследствие изменения толщины пластинки при ее наклоне по отношению к нормали к поверхности		Изменение угла поворота, соответствующее только углу наклона оптической оси по отношению к нормали к поверхности	
непараллельность, мм	угол поворота	наклон	угол поворота	наклон	угол поворота
1	$0,02^\circ$	$145'$	$0,02^\circ$	$240'$	$0,02^\circ$
0,5	$0,01^\circ$	$110'$	$0,01^\circ$	$120'$	$0,01^\circ$
0,25	$0,005^\circ$	$60'$	$0,005^\circ$	$60'$	$0,005^\circ$
0,1	$0,002^\circ$	$30'$	$0,002^\circ$	$24'$	$0,002^\circ$

Заключение

Для поддержания единства измерений угла вращения плоскости поляризации в Советском Союзе необходимо установить рациональные допуски на поляриметрические пластинки и наладить их производство.

Что касается допусков на пластинки и их оправы, то при испытании пластинок необходимо устанавливать суммарный допуск максимального наклона пластинки по отношению к линии, соединяющей центры опорных колец направляющей трубки, а не допуск на разность диаметра выточки оправы пластинки ($0,5 \text{ мм}$) и на свободное расстояние между плоскостью зажимного кольца и поверхностью пластинки вдоль оси оправы ($0,1 \text{ мм}$).

Рассмотрение допусков, принятых по международному соглашению, в целом показало, что их значения весьма близки к максимально возможным для сахариметров с ценой деления $0,1^\circ \text{S}$, подобных допусков следует в дальнейшем придерживаться при изготовлении наиболее распространенных типов поляриметрических пластинок для поверки сахариметров типа КИП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zeitschrift Zuckerindustrie, № 1 u. 9, 1937.
2. Frederick I. Bates and Associates, Polarimetry, saccharimetry and the sugars, Washington (circular C 440), 1942.
3. Левин Б. М., Духопел И. И., Интерферометр для контроля плоскостей и плоскопараллельности, «Оптико-механическая промышленность», № 6, 1958.
4. Brodhun E., Schönrock O., Zeitschrift für Instrumentenkunde, Bd. 22, 1902, S. 253.
5. Gumlich E., Wissensch. Abhandl., PTR 2, 1895, S. 212.
6. Bruha Georges, Traité de polarimétrie, 1930.
7. Волкова Е. А., Милютин Н. П., Метод исследования лимба гониометра. Труды ВНИИМ, вып. 16(76), 1951.
8. Арлей Н., Бух К., Введение в теорию вероятностей и математическую статистику, ГИТТЛ, М., 1951.
9. Шубников А. В., Кварц и его применение, АН СССР, М—Л, 1940.

Поступила в редакцию
5/1 1960 г.

В. Е. КАРТАШЕВСКАЯ
ВНИИМ

ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА ЛУЧИСТОЙ МОЩНОСТИ

В статье приведены результаты опытного определения светового эквивалента лучистой мощности по двум сериям измерений одного и того же лучистого потока: в люменах — посредством глаза и в ваттах — посредством термостолбика, снабженного жидким поглотителем, воспроизводящим по спектру значения относительной видности. Установлено, что опытное значение светового эквивалента отличается от расчетного в пределах точности измерений.

Световой эквивалент лучистой мощности или отношение монохроматического светового потока $F_{\lambda m}$ (лм) к монохроматическому потоку излучения $P_{\lambda m}$ (вт) при длине волны λm , соответствующей наибольшей чувствительности среднего глаза, показывает численное соотношение между световыми и энергетическими единицами

$$K_m = \frac{F_{\lambda m}}{P_{\lambda m}} \text{ лм/вт.} \quad (1)$$

При излучении в некотором спектральном участке он выражается как

$$K_m = \frac{F}{\int_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} d\lambda} \text{ лм/вт.} \quad (2)$$

Световой эквивалент может быть определен расчетным путем по формуле Планка, примененной для светового эталона в виде полного излучателя при температуре затвердевания платины.

$$K_m = \frac{60\pi}{C_1 \int_{400}^{760} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} v_{\lambda} d\lambda} \text{ лм/вт.}$$

Для принятых в настоящее время значений постоянных C_1 , C_2 и v_{λ} световой эквивалент составляет 683 лм/вт.

Точность расчетного определения (при данных значениях относительной видности) зависит от точности, с которой известны постоянные C_1 и C_2 . Особенно существенное влияние оказывает постоянная C_2 , изменение которой в пределах $\pm 0,2 - \pm 0,3\%$ * ведет к изменению величины светового эквивалента в пределах $\pm 3 - \pm 4\%$.

Однако соотношение действующих световых и энергетических единиц зависит, кроме того, от точности их воспроизведения.

Световые единицы воспроизводятся посредством светового эталона в виде полного излучателя. Энергетические единицы воспроизводятся посредством образцовых радиометров — приемников лучистой мощности, работающих по принципу уравнивания теплового действия падающей лучистой и подводимой электрической мощности.

Независимые методы воспроизведения и передачи единиц обуславливают наличие своих исходных погрешностей в каждой из областей измерений.

Положение практически не изменится, если в энергетических измерениях лучистой мощности принять эталон в виде полного излучателя. Устройство последнего в этом случае должно значительно отличаться от действующего светового эталона, и пути практического воспроизведения тех и других единиц останутся по-прежнему различными. Между тем, внутренняя связь энергетических и световых измерений и необходимость в ряде случаев сопоставления результатов этих измерений требуют проверки на опыте фактически имеющегося соотношения между действующими световыми и энергетическими единицами. Эта проверка и составляла первую задачу настоящей работы.

С другой стороны, хотя в настоящее время погрешности энергетических измерений из-за малой чувствительности тепловых приемников, их неполной черноты в широкой области спектра, а также влияния окружающих тепловых помех и выше погрешностей световых измерений, тем не менее развитие последних на основе неселективных приемников лучистой мощности представляет для будущего значительный интерес и определенные перспективы. При условии надлежащего повышения точности таким путем в дальнейшем могут быть получены не только новая методика точных объективных световых измерений, но и новый способ воспроизведения световых единиц.

Исследование путей необходимого повышения точности энергетических измерений в применении к целям фотометрии являлось второй задачей данной работы.

Выбор исходного выражения. Зависимость светового эквивалента от свойств среднего глаза делает его, строго говоря, не физической константой в обычном понимании, а, вернее, некоторой статистической величиной, устанавливающей определенную среднюю связь между двумя областями измерений. Статистический характер величины светового эквивалента отражен явно в выражении (2) для сплошного излучения в широком спектральном участке.

Напротив, выражение (1), связанное по определению только с монохроматическим излучением, не содержит в себе прямых указаний на зависимость светового эквивалента от чувствительности среднего глаза в других областях спектра. Отсюда казалось бы возможным предположить, что измерение светового эквивалента, выполненное в соответствии с данным определением, должно дать однозначный ответ, независимо от возможных уточнений для относительной видности глаза.

* За последние 20 лет для международной температурной шкалы последовательно принимались такие значения C_2 : 1,435; 1,432; 1,438 см·град.

Однако постановка такого опыта в чистом виде оказывается невозможной, поскольку световые измерения монохроматического потока обязательно включают в себя переход к излучению существующих световых эталонов с непрерывным спектром.

Для опытного определения светового эквивалента выражения (1) и (2) теоретически равноценны. Световые потоки, которые значатся в числителях обеих дробей, должны быть измерены глазом (с применением в случае необходимости того или другого метода разноцветной фотометрии) или любым иным приемником с исправленной под глаз спектральной чувствительностью. Величины, стоящие в знаменателе, представляют мощность лучистой энергии и измеряются приемниками лучистой мощности, поверенными в энергетических единицах. При сложном спектральном составе для измерений лучистой мощности требуется выделить именно ту часть излучения, которая воспринимается глазом $\left(\int_{\lambda_0}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} d\lambda \right)$. Это выделение можно осуществить посредством

исправляющих поглотителей, примененных с объективными приемниками лучистой мощности. При использовании неизбирательного приемника — термоэлемента, такой поглотитель должен иметь относительное спектральное пропускание, полностью совпадающее с относительной видностью. В случае применения фотоэлемента, исправляющий поглотитель подбирается индивидуально в соответствии с предварительно изученной спектральной чувствительностью данного приемника.

В случае выражения (2) спектральный состав излучения источника может быть выбран близким к излучению световых эталонов; при этом световые измерения не представляют особой трудности и могут быть выполнены с высокой точностью. Напротив, при использовании выражения (1) они становятся весьма трудными и точность их резко снижается. Последнее справедливо как в случае измерений глазом (например, с помощью мигающего фотометра), так и при каком-либо объективном приемнике, который должен быть снабжен очень тщательно подобранным исправляющим поглотителем.

В отношении энергетических измерений условия на первый взгляд кажутся обратными, т. е. более сложными в случае выражения (2), где требуется применение специально подобранного исправляющего поглотителя. Однако в обоих случаях для снижения погрешностей измерения необходимо руководствоваться общепринятым правилом возможного сближения условий градуировки приемников и их последующего применения. С этой точки зрения выражение (2) имеет несомненные преимущества перед выражением (1). Градуировка в световых единицах всегда, а в энергетических в огромном большинстве случаев выполняется по источнику излучения с непрерывным спектром. Изменение спектрального состава излучения с переходом к измерениям потока лучистой мощности, выделенного исправляющим поглотителем и равного $\int_{\lambda_0}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} d\lambda$, несомненно значительно меньше, чем с переходом к моно-

хроматическому излучению. С другой стороны, как уже отмечено выше, введение исправляющего поглотителя все равно остается неизбежным и при выражении (1) для измерений светового потока. При выражении (1), кроме того, возникает дополнительная задача выделения монохроматического излучения достаточной мощности и постоянства.

Исходя из этих соображений, для опытного определения светового эквивалента в данной работе выбрали выражение (2).

Как уже сказано, основную трудность при определении светового эквивалента представляют энергетические измерения. В число их входят следующие:

а) определение чувствительности c данного термоприемника при градуировке последнего по образцовой лампе с известной силой излучения:

$$c = \frac{e_0}{P_0} = \frac{e_0}{\int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda} \quad \text{в/вт.}$$

Основой градуировочного уравнения является предположение постоянства коэффициента c во всей спектральной области излучения данного источника;

б) подбор и измерение спектральных коэффициентов исправляющего поглотителя, посредством которого будет выделено излучение, подлежащее измерениям

$$\int_{400}^{760} P_{\lambda} \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda m}} d\lambda = \int_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} d\lambda \cdot \frac{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda m}} \Delta\lambda}{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} \Delta\lambda},$$

где дробный множитель близок к единице;

в) измерение лучистой мощности посредством термоприемника, снабженного исправляющим поглотителем

$$e_1 = c \tau_{\lambda m} \int P_{\lambda} \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda m}} d\lambda.$$

Подставляя это равенство в выражение (2), имеем

$$K_m = \frac{F c \tau_{\lambda m}}{e_1} \cdot \frac{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda m}} \Delta\lambda}{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} \Delta\lambda} = \frac{F e_0 \tau_{\lambda m}}{P_0 e_1} \cdot \frac{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} \frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda m}} \Delta\lambda}{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} \Delta\lambda}. \quad (2a)$$

Формула имеет аналогичный вид при использовании для измерений лучистой мощности фотоэлемента

$$K_m = \frac{F S_{\lambda m}}{i} \cdot \frac{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda m}} \Delta\lambda}{\sum_{400}^{760} P_{\lambda} v_{\lambda} \Delta\lambda}, \quad (2б)$$

здесь S_{λ} — спектральная чувствительность фотоэлемента, снабженного исправляющим поглотителем, в амперах на ватт;

i — измеренное значение фототока в амперах.

При идеальной подгонке исправляющих поглотителей дробный множитель в выражениях (2а) и (2б) исчезает, превращаясь в единицу, и формулы упрощаются.

При неполной подгонке поглотителя этот же множитель может быть использован для подсчета поправки к измеренному значению K_m в зависимости от распределения энергии в спектре источника. Однако определение таких поправок, требующее точных измерений P_λ и S_λ в широком участке спектра, грубо и ненадежно, и по существу должно ограничиваться пределами видимого спектра. Для учета неисключенного поглотителем „невидимого“ излучения должны быть поставлены дополнительные измерения (см. ниже).

Выбор приемника. При выборе для измерений приемника того или другого вида должны быть рассмотрены предъявляемые к нему требования и связанные с его применением погрешности.

Общими требованиями для термоприемника и фотоэлемента являются: а) постоянство чувствительности (коэффициентов c и $S_{\lambda m}$) во времени и в зависимости от освещенности в широких пределах изменения последней; б) хороший подбор исправляющих поглотителей; в) исключение возможных добавочных излучений (за счет флюоресценции, нагрева, отражений и пр.) со стороны исправляющего поглотителя на приемник.

Дополнительные требования составляют: а) для термоприемника — неизменность поглощения (постоянство коэффициента c) в широком спектральном диапазоне; б) для фотоэлемента — постоянство спектральной чувствительности в различных условиях работы и постоянство чувствительности по поверхности катода.

Относительная точность измерений с фотоэлементами обычно выше точности, которую можно получить при измерении термотоков. Однако в данном случае использование фотоэлементов не исключает измерений с термоприемником в силу необходимости определения относительной и абсолютной спектральной чувствительности фотоэлемента. При этом измерения термотоков протекают здесь в особо неблагоприятных условиях из-за малых значений лучистой мощности в спектре. Кроме того, имеющиеся фотоэлементы пока еще не вполне удовлетворяют высоким требованиям в отношении равномерного распределения чувствительности по катоду. Нилучшее соблюдение этого условия было найдено у некоторых селеновых фотоэлементов, которые по другим признакам менее пригодны для точных измерений. Из этих соображений в основу работы были положены измерения с термоприемниками.

О точности энергетических измерений. Точность измерения светового эквивалента прежде всего зависит от точности энергетических измерений величин c и e . Для повышения ее требуется повысить устойчивость и чувствительность измерительных установок.

Измерения малых термоэлектродвижущих сил или термотоков в большой мере осложнены температурными влияниями различного рода. Колебания внешней температуры отражаются как на самом приемнике, участвующем в теплообмене с окружающей средой, так и на его измерительной цепи, где в случае ее неоднородности возникают паразитные термоэлектродвижущие силы. Характерным следствием теплообмена со средой и непрерывного фона теплового излучения является невозможность создания для термоприемников полной «темноты». Неустойчивое положение «нуля» измерительной схемы, вызванное влиянием паразитных величин, снижает возможную точность отсчета и препятствует применению усиления. Трудности измерений возрастают при наличии переменных составляющих паразитных величин, скорость изменения которых сравнима со скоростью выполнения измерений.

В качестве защиты против лучистого теплообмена для создания более устойчивых и постоянных условий работы лаборатория уже давно

и с успехом применяет многослойные металлические щиты с чередующимися по величине коэффициентами отражения [1, 2]. Такое расположение отражающих поверхностей снижает теплообмен до 2—3%. При данных измерениях, кроме того, было осуществлено упрощенное термостатирование приемника без герметически замкнутой полости.

В состав термостатирующего устройства входят: полость (рис. 1), где помещается термоприемник, окруженная змеевиком и теплоизолирующей оболочкой; защитные многослойные щиты (рис. 2) с отверстия-

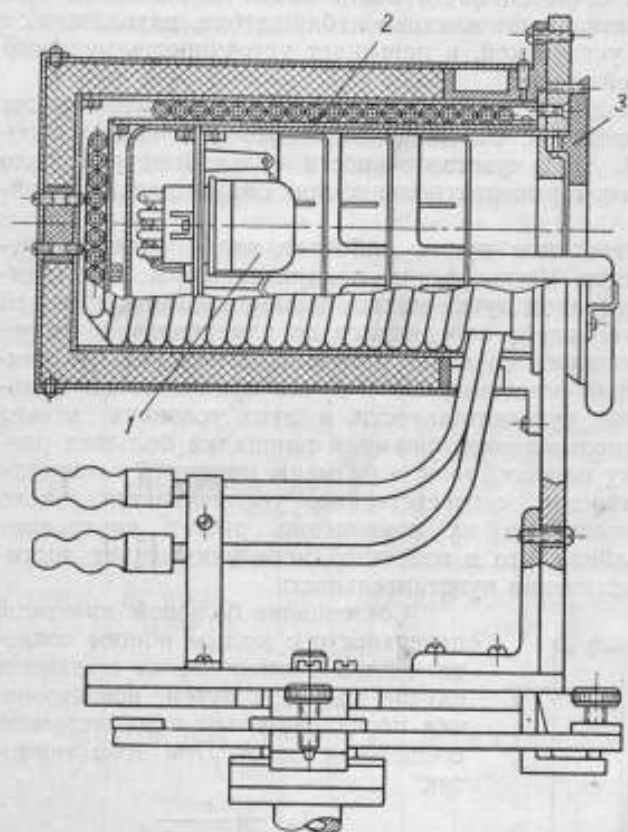


Рис. 1. Полость термостатирующего устройства.

1 — термоприемник; 2 — змеевик с водой; 3 — щиток асбестовый.

лирующей оболочкой; защитные многослойные щиты (рис. 2) с отверстия-

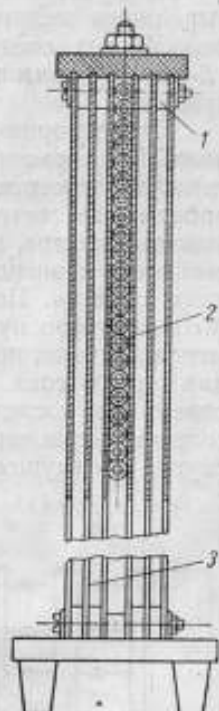


Рис. 2. Многослойный защитный щит.

1 — изолирующая прокладка; 2 — змеевик; 3 — алюминиевые листы.

ми и змеевиком у внутреннего слоя; термостат, соединенный последовательно с указанными змеевиками и дающий воду определенной температуры.

Полость для термоприемника представляет собой металлический стакан, ось которого при работе располагается горизонтально, совпадая с направлением лучей света, падающих на приемник. По ходу лучей перед приемником помещено несколько металлических щитков внутри стакана и теплоизолирующий щиток у наружного отверстия. Щитки служат для защиты полости от излишнего облучения и свободно пропускают через имеющиеся в них отверстия измеряемый лучистый поток к приемнику. Теплоизолирующий щиток предохраняет металлические щиты от нагрева падающим излучением. Нагрев их ослабляется также благодаря оттоку тепла к массивным стенкам стакана.

Между приемником и источником света для создания постоянного фона излучения устанавливаются многослойные щиты (рис. 2). Щиты

состоят из шести алюминиевых листов, изолированных друг от друга эбонитовыми прокладками. К внутреннему листу припаян эмеевик, плотно навитый по всей поверхности листа вокруг центрального его отверстия. В отделке листов чередуются матовое чернение и полировка металла. При установившейся температуре воды перепад температур в различных участках полости не превышает $0,03-0,05^{\circ}\text{C}$ и даже при непрерывном освещении остается почти постоянным. Тепловая защита практически полностью исключает влияние наблюдателя, находящегося рядом с измерительной установкой, и повышает устойчивость нулевого положения измерительной схемы.

Измерительные цепи для термоэлектродвижущих сил и термотоков выполнены медным проводом с наименьшим возможным числом промежуточных соединений. При чувствительности гальванометра около $1,5-2 \cdot 10^{-8}$ в/мм заметных термоэлектродвижущих сил в цепях не обнаружено.

Лаборатория уже некоторое время работает над созданием специальных термоприемников. Часть из них предназначалась для спектральных измерений в световом пучке малых размеров. Для настоящей работы, где световой эквивалент определялся по измерениям в непрерывном спектре, потребовалось создание приемников высокой чувствительности к энергетической освещенности в пучке сравнительно большого сечения. Повышение чувствительности в этих условиях может быть получено путем использования приемной площадки больших размеров. Однако, поскольку целесообразные размеры приемной площадки для одного спаев ограничены, соответственно увеличивается число спаев; при последовательном же их соединении растет внутреннее сопротивление термостолбика, что в известной мере уничтожает достигнутые преимущества увеличения чувствительности.

Совмещение большой приемной поверхности с малым общим сопротивлением термостолбика в данном случае получено путем использования последовательно-параллельного соединения спаев. При этом термо-

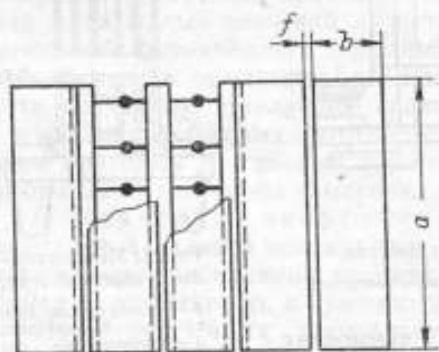


Рис. 3. Схема соединений термостолбика.

поверхностью для параллельно соединенных спаев служит одна общая полоска — серебряная пластинка, зачерненная снаружи. Ее ширина и расположение проволочек спаев таковы, что холодные спаи оказываются прикрытыми от прямого излучения.

Подбор наиболее выгодных размеров и соотношений осуществлен частично посредством опытов, поставленных для данной работы, частично (например, предельная длина спаев) на основании литератур-

$$i = \frac{e}{R_g + \frac{r}{n_2 + n_1}}$$

где e и r — термоэлектродвижущая сила и сопротивление одного спаев;

n_2 и n_1 — число последовательно и параллельно соединенных спаев;

R_g — сопротивление гальванометра.

Схема соединений термостолбика показана на рис. 3. Приемной

ных данных [3]. В подборе учитывалась зависимость приемника от следующих факторов: а) числа параллельных спаев в полоске — для определения наиболее выгодного размера площадки одного спая; б) диаметра проволоки — для согласования требований наименьшей массы спая и наименьшего сопротивления; в) длины проволоки — для установления наименьшей величины сопротивления при наименьшей отдаче тепла от спая. Соотношение чисел n_1 и n_2 выбрано с учетом сопротивления имеющегося гальванометра и минимального сопротивления термоспая из данных материалов.

Размеры одного из осуществленных поверхностных термостолбиков (ХК-2) следующие: $a = 15$ мм; $b = 0,5$ мм; $f = 0,1$ мм; $l = 2$ мм; толщина приемной серебряной пластинки 3—4 мк; диаметр проволоки спая около 24 и 26 мк; $n_1 = 6$. Для чернения приемной поверхности лаборатория в начале своих исследований применяла копоть камфары, позднее — платиновую чернь. Последнюю наносили посредством электролиза хлорной платины при плотностях тока около 65 ма/см².*

Сведения по различным приемникам ВНИИМ приведены в табл. 1 наряду с данными одного из термостолбиков фирмы Кипп, имеющегося в лаборатории.

Таблица 1

Изготовитель	Обозначение термостолбиков	Число последовательных спаев	Площадь приемной поверхности, мм ²	Сопротивление, ом	Чувствительность			Материал спаев	Вид спаев, чернение
					мкв.м/ат	в/ом	в/ат		
ВНИИМ	ВС-ВО-1 (1954 г.)	10	9	21,3	3,3	0,3 ₇	0,01 ₇	Висмут—сурьма и висмут—олово	Лента; копоть камфары
		1*	0,9	2,1	0,3 ₃	0,3 ₇	0,1 ₈		
	ХК-1 (1955 г.)	50	8,4	140	6,4	0,7 ₆	0,005 ₄	Хромель и копель	Лента; копоть камфары
		1*	0,1 ₇	2,8	0,1 ₃	0,7 ₆	0,2 ₇		
ХК-2 (1957 г.)	30	225	21	45	0,2	0,005 ₅	То же	Проволочка с приемной пластинкой; платиновая чернь	
	1*	7,5	0,7	1,5	0,2	0,2 ₉			
ХК-3 (1957 г.)	16**	160	26	21	0,1 ₃	0,005 ₀			
	1*	1	1,6	1,3	0,1 ₃	0,08 ₂			
Кипп	№ 325164	16	50	16,5	9,6	0,1 ₉	0,01 ₁	(Константан-манганин)?	Лента
		1*	8,1	1,0	0,6	0,1 ₉	0,1 ₉		

* Ступенно расчетов к одному спая.

** 16 рабочих и 16 компенсационных.

* Серебряную пластинку обрабатывают горячей щелочью, промывают дистиллированной водой и опускают в раствор хлорной платины, где она служит отрицательным электродом. Для осуществления чернения с одной стороны пластинки ее обратную сторону покрывали полистиролом, который затем смывали бензином.

Опытное определение светового эквивалента. Для опытных определений светового эквивалента была отобрана и испытана группа из пяти светоизмерительных ламп типа № 6 (107 в, 350 вт). Лампы были отдельно поверены при трех значениях цветовой температуры (2375, 2720 и 2820° К) на силу света I в свечах и силу излучения I_s в ваттах на стерадиан. Световые измерения выполнены с помощью зрительного фотометра путем сравнения с рабочими эталонами и образцовыми лампами силы света при соответствующих значениях цветовой температуры. Погрешность воспроизведения свечи по данной группе ламп составляет около $\pm 0,3 - \pm 0,4\%$.

Энергетические измерения выполнены посредством сравнения с образцовым абсолютным радиометром актинометрической лаборатории ВНИИМ. Погрешность поверки ламп в энергетических единицах составляет около $\pm 0,5\%$ без учета собственной погрешности радиометра.*

Три значения цветových температур выбраны для создания различных условий измерения и проверки в этих условиях влияния на результат не вполне точного подбора исправляющего поглотителя.

Для окончательных измерений светового эквивалента поверенные лампы устанавливались поочередно перед термopриемником (применялось четыре термостолбика различного вида). Выражение (2а) в приложении к данным измерениям преобразуется так:

$$K_m = \frac{I_{e_0}}{I_{e_1}} \cdot \tau_{1m} \cdot \frac{\sum_{400}^{760} P_\lambda \frac{\tau_\lambda}{\tau_{1m}} \Delta\lambda}{\sum_{400}^{760} P_\lambda v_\lambda \Delta\lambda}$$

Здесь величины F и P — светового и лучистого потока — заменены пропорциональными им величинами силы света — I и силы излучения — I_s . Величины термоэлектродвижущей силы e_1 и e_0 измеряются при установленном исправляющем поглотителе и без него, причем расстояние между источником света и приемником в обоих случаях одинаково с учетом поправки на сокращение пути лучей света в толще поглотителя. Точное определение этого расстояния в данном случае несущественно. Указанное преобразование, равносильное переходу от значений потоков к значению освещенностей, оказывается необходимым в силу затруднительности точного определения площади приемника.

Исправляющий поглотитель для термopриемника подобран на основании литературных данных [4] и последующих исследований фотометрической лаборатории ВНИИМ; его химический состав:

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,36 М
$\text{CoSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,030 .
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0,0042 .
Толщина слоя	10 мм

Поправочный коэффициент для величины светового эквивалента, учитывающий отступления введенного поглотителя от идеального, в видимой части спектра составляет около 0,2% и практически почти не зависит от распределения энергии в этой области. Более существенной

* О точности воспроизведения энергетических единиц косвенно можно судить по взаимным сравнениям, проведенным для двух термopриемников ВНИИМ с Национальной физической лабораторией Англии. В 1957 г. расхождение двух лабораторий составило около 0,1%; в 1959 г. — около 0,4%.

является поправка на некоторую долю инфракрасного излучения, проходящего через исправляющий поглотитель. Спектральное пропускание последнего за пределами видимого спектра было измерено на инфракрасном монохроматоре оптической лаборатории ВНИИМ до 1,1 мк; в пределах 0,8—1,1 мк оно оказалось практически равным нулю. Дополнительная проверка произведена с помощью стекла ИКС-1 толщиной около 4 мм, поглощающего целиком видимую область спектра и пропускающего по П-образной кривой в области 1—2,5 мк; в этом участке обнаружена некоторая доля излучения, проходящего через исправляющий поглотитель. Величина e_1 , измеренная при исправляющем поглотителе, должна быть поэтому записана так:

$$e_1 = c \left[\sum_{400}^{760} P_i \tau_{sv} \Delta\lambda + P_i \tau_{vi} \right],$$

где τ_{sv} — спектральное пропускание исправляющего поглотителя в видимой области спектра;

τ_{vi} — пропускание того же поглотителя для инфракрасной области.

Для исключения измеренной доли инфракрасного излучения $\Delta = c P_i \tau_{vi}$ выполнено несколько вспомогательных измерений:

$$\begin{aligned} 1) e_2 &= c \tau_i P_i; & 2) e_3 &= c P_i \tau_i^2; \\ 3) e_4 &= c P_i \tau_i \tau_{vi}; & 4) e_5 &= c P_i \tau_i^2 \tau_{vi}. \end{aligned}$$

Термоэлектродвижущие силы — e_2, e_3, e_4, e_5 — измерены при различных сочетаниях введенных поглотителей: 1) одно стекло ИКС-1 с пропусканием τ_i в инфракрасной области; 2) два одинаковых стекла ИКС-1; 3 и 4) одно или два стекла ИКС-1 вместе с исправляющим поглотителем.

Поправка Δ вычисляется в предположении, что стекло ИКС-1 имеет П-образную форму пропускания, тогда

$$\Delta = \frac{e_2 e_4}{e_3} = \frac{e_4^2}{e_5}.$$

Поправки определялись для трех цветовых температур. Они невелики (около 3—6% от величины e_1) для высоких температур, где, следовательно, без большого ущерба для точности конечного результата их можно определять даже со значительной погрешностью. При температуре 2375° К измеренная доля инфракрасного излучения составляет около 20% от величины e_1 , а потому неточность в ее определении становится существенной.

Найденные значения светового эквивалента (усредненные по рядам измерений для всех ламп) при разных условиях измерений и четырьмя различными приемниками приведены в табл. 2. Среднее взвешенное составляет 673 лм/вт; средняя квадратичная ряда — около 10 лм/вт — характеризует полученную точность световых и энергетических измерений.

При обработке двойной вес придан измерениям при более высоких температурах и посредством термостолбиков ВНИИМ, как имеющих наибольшую чувствительность и поэтому обеспечивающих большую точность в определении величин e_1 и e_5 . Однако вычисленные значения оказались мало зависящими от весов измерений. Отступление измеренного значения светового эквивалента от расчетного составляет около 1,5%. Оно лежит практически в пределах точности выполненных измерений и, таким образом, косвенно подтверждает согласованность световых

и энергетических измерений во ВНИИМ. Данная работа была закончена в 1957 г.

Двумя годами ранее величина светового эквивалента предварительно определялась в той же фотометрической лаборатории ВНИИМ посредством селеновых фотоэлементов. Было получено несколько большее значение, чем теперь; отклонение от последних результатов лежит в пределах двойной средней квадратичной погрешности; погрешность энергетических измерений была также несколько больше.

Таблица 2

Серия измерений	Цветовая температура лампы, °К	Значения светового эквивалента, измеренные			
		абсолютным радиометром*	термостолбами		
			Канн	ХК-2 ВНИИМ	ХК-3 ВНИИМ
1	2820	664	662	671	674
2	2720	688 *	667	671	678
3	2375	681	672	672	684
Среднее		676	667	671	679
Общее среднее . .		673 ± 10 м.м/вт			
* Чувствительность радиометра около 2,6 мкв.м ² /вт.					

Выполненная работа является первым шагом для расширенного применения во ВНИИМ энергетических измерений в области фотометрии.

Для сопоставления данной работы и ее направления с зарубежными исследованиями можно отметить следующее.

Прямые работы по опытному определению светового эквивалента ставились давно и редко [5, 6]. Однако за последнее время значительно возрос интерес к энергетическим измерениям в фотометрии (Национальное бюро стандартов США, Национальная физическая лаборатория в Англии), что по существу является тем же самым вопросом. Насколько можно судить по немногим литературным данным [7—9], точность измерений, достигнутая в указанных лабораториях и во ВНИИМ, находится, примерно, на одном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шорин С. Н., Теплопередача, Гос. изд. литературы по строит. и архитект., М.—Л., 1952.
2. Карташевская В. Е., Определение спектральной чувствительности глаза, Труды ВНИИМ, вып. 17(77), 1952, стр. 1—16.
3. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Установка для проверки ваттметров, амперметров и вольтметров на переменном токе нормальной и повышенной частоты, Труды ВНИИМ, вып. 28(88), 1956, стр. 20—35.
4. Preston J. S., «Journ. Sc. Inst.», v. 23, № 9, 1946, p. 211—216.
5. Krefft H. und Pirani M., «Zeitschr. f. techn. Phys.», Bd. 13, 1932, S. 367.
6. Roetgers G. A. W., «Physica», v. 15, 1949, p. 985—989.
7. Teele R. P., «Journ. of Res.», NBS, v. 27, 1941, p. 217.
8. Teele R. P., «Journ. of Res.», NBS, v. 44, 1954, p. 869.
9. Reports of the NPL 1954—1956.

Поступила в редакцию
4/9 1960 г.

В. Е. КАРТАШЕВСКАЯ
ВИНИМ

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ МОЩНОСТИ В ПУЧКЕ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

В статье предложен способ измерения лучистого потока на площади неизвестных размеров приемником с неопределенной формой приемной поверхности путем равноступенного перемещения этого приемника по горизонтали и по вертикали. Распределение освещенности по площади освещенного пятна и чувствительности по площади приемника может быть неравномерным. Способ подвергнут экспериментальной проверке.

В некоторых случаях спектральных измерений, например при определении спектральной чувствительности различных приемников, оказывается необходимым измерять в ваттах поток лучистой мощности, прошедший через выходную щель монохроматора. В этом случае лучистый поток распространяется внутри малого телесного угла и часто имеет неравномерную плотность по сечению.

При первом рассмотрении поставленной задачи для ее решения представляется необходимым добиться полного уравнивания и взаимного совмещения поверхности приемника, воспринимающего излучение, с изображением выходной щели. Соблюдение этого требования должно обеспечить измерение всего лучистого потока энергии, выходящего из щели, и приблизить условия измерений к условиям градуировки приемника.

Однако осуществить точное выполнение этого требования не легко, и тем труднее, чем меньше поверхность приемника и чем меньше изображение щели. Дополнительные погрешности измерений могут также возникнуть вследствие неравномерного распределения освещенности в световом пучке и неравномерной чувствительности приемника по поверхности. Первое обстоятельство вызывает неизбежное отступление от условий градуировки, которая обычно производится при полном и равномерном заполнении световым пучком поверхности приемника; второе — искажает результат измерений в спектральном неоднородном пучке даже при заполнении им всей приемной поверхности.

Во избежание указанных трудностей измерений и для исключения погрешностей, связанных с неравномерностью освещения и чувствительности приемника, определение относительной и абсолютной спектральной чувствительности обычно разделяют на два независимых измерения: первое выполняют на установке с монохроматором, а второе —

с источником линейчатого или сплошного спектра, снабженным фильтрами [1]. В этом втором случае можно обеспечить равномерное распределение освещенности в пучке значительного сечения и таким образом существенно упростить обстановку измерений. Однако при всей правомочности и распространенности такого способа измерений в отношении его применения можно сделать несколько замечаний. Для его осуществления требуется добавочная измерительная установка и выполнение отдельных измерений с фотоэлементом и термоэлементом; условия измерений должны быть при этом сопоставимы с условиями измерений относительной спектральной чувствительности на монохроматоре; источник света должен обеспечивать достаточную устойчивость и монохроматизацию излучения. Кроме того, фотоэлемент и термоэлемент должны устанавливаться строго в одном и том же месте при одной и той же энергетической освещенности. Это условие при обычно сильно различающейся площади приемной поверхности является невыгодным для термоэлемента по сравнению с фотоэлементом и с обстановкой измерений на монохроматоре и может снизить точность энергетических измерений.

Затруднение представляет и выбор источника света. Видимо, наилучшим для этих измерений является специальная ртутная лампа, так называемая ультрафиолетовая «нормаль», пока еще не освоенная у нас в широком производстве. От других газоразрядных источников света и при контроле их на переменном токе с соответствующими измерительными приборами нельзя ожидать постоянства, равного устойчивости лампы накаливания, работающей и контролируемой на постоянном токе.

Степень монохроматизации у источника света с фильтрами неизбежно ниже, чем в установке с двойным монохроматором, и должна быть отдельно проверена в каждом конкретном случае. В зависимости от спектральной чувствительности того или другого испытуемого приемника наличие общего фона или отдельных паразитных линий влияет более или менее сильно на итог измерений. Для отдельного вида катодов подбор фильтров и рабочих спектральных линий может оказаться затруднительным.

Таким образом, определение абсолютной спектральной чувствительности данным методом внесет в конечный результат свою долю погрешностей.

В литературе [2] известен также (хотя, видимо, мало применялся) способ суммирования лучистых потоков непосредственно на выходе монохроматора. Авторы предложили и испытали его для абсолютных измерений лучистой мощности посредством линейных термостолбиков, приемная поверхность которых по длине полностью или с некоторым запасом перекрывает изображение выходной щели, а по ширине меньше этого изображения. Лучистый поток, упавший на площадку, измеряется путем равноступенчатого перемещения термоприемника в поперечном направлении ввиду освещенного пятна и вычисляется как

$$\frac{\sum e_i}{c} \cdot \frac{\alpha}{d},$$

где e_i — значения т. э. д. с. в некоторых единицах, измеренные при поперечном смещении;

c — чувствительность термоприемника, $вт/в$;

α — шаг перемещения;

d — ширина приемной поверхности (щели приемника), $мм$.

Возможность применения такого способа измерений указана авторами на том основании, что распределение освещенности вдоль изображения достаточно равномерно для усреднения самими термоприемниками, чувствительность которых в том же направлении меняется в пределах не более $\pm 10 \div 15\%$. Для поверхностных термопар, чувствительность которых по поверхности меняется значительно сильнее, данный способ считался неприменимым. Для использования поверхностных термопар предлагалось искусственно превращать их в линейные путем наложения соответствующих диафрагм и градуировать в этих же условиях.

В настоящей статье предлагается развитие последнего способа измерений, дающее возможность измерять лучистый поток, упавший на площадку, вне зависимости от распределения на ней освещенности, от распределения чувствительности по поверхности приемника, от соотношения размеров и формы освещенного пятна и приемной поверхности.

Сущность предложенного видоизменения способа измерений состоит в следующем. Для учета неравномерности в энергетической освещенности и неодинаковой чувствительности отдельных участков приемника необходимо, чтобы все части светового пятна, имеющие различную освещенность, были бы измерены каждым из участков приемника, имеющим чувствительность, отличную от средней. Для этого требуется, чтобы каждый участок приемника прошел последовательно через все части светового пятна или, иначе говоря, был бы освещен последовательно от всех участков выходной щели.

Осуществить это требование на деле возможно таким образом. Пусть световое пятно имеет размеры HD , а приемник — hd (рис. 1). Если последний смещать относительно светового пятна поочередно в продольном (вертикальном) и поперечном (горизонтальном, но в прежней вертикальной плоскости) направлениях, то при различных положениях приемника площадь освещенной части его поверхности будет изменяться от

максимума до нуля. Естественно, что любой участок приемника, будучи освещен, находится и перемещается внутри светового пятна HD . Принимая за положение термостолбика те точки, с которыми совпадает его геометрическая середина, находим, что поверхность его будет освещена полностью при смещении в пределах площадки $(H-h) \cdot (D-d)$. Площадка $(H+h) \cdot (D+d)$ ограничивает те положения термодатчика, при которых какая-либо часть его оказывается освещенной. Именно в этих пределах требуется перемещать приемник, чтобы обеспечить прохождение всех его частей через все световое пятно. Чтобы соблюсти, кроме того, равное участие в измерениях всех элементов приемника и всех частей светового пятна, необходимо, чтобы шаг перемещения был постоянным для каждого из направлений в отдельности.

Разобьем мысленно весь приемник на l равных частей, из которых каждая имеет размеры

$$\frac{d}{l} \cdot \frac{h}{l} = \alpha\beta$$

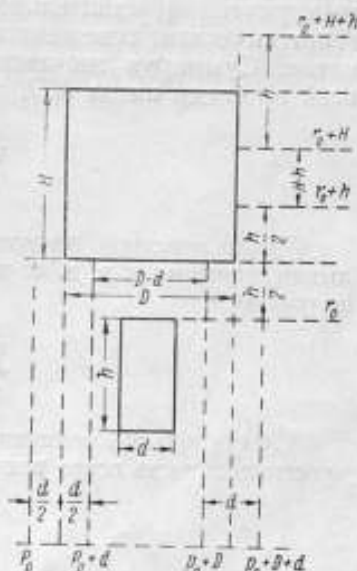


Рис. 1. Схема смещений термодатчика по поверхности освещенного пятна.

и одновременно выберем величины шагов смещения по горизонтали и по вертикали, равные соответственно α и β . Каждая выделенная часть приемника в световом пятне размерами HD уложится M раз, где

$$M = \frac{D}{\alpha} \cdot \frac{H}{\beta} = qz.$$

Условно считаем, что чувствительность для любого участка $\alpha_i \beta_j$ приемника есть величина постоянная внутри этого участка, и что постоянное значение имеет также освещенность внутри каждого участка $\alpha_j \beta_m$ светового пятна.

Если рассматривать только одну из выделенных частей приемника $\alpha_i \beta_j$ при поочередном смещении относительно светового пятна, то для различных ее положений термоэлектродвижущая сила e_{ijfm} будет равна $k_{ij} E_{fm}$, где k_{ij} — коэффициент пропорциональности, характеризующий чувствительность данного участка приемника, а E_{fm} — энергетическая освещенность в некотором участке ($\alpha_j \beta_m$) светового пятна. Суммируя значения т. э. д. с., измеренных для участка $\alpha_i \beta_j$ по всей площади пятна HD , получаем

$$\sum_1^{qz} e_{ijfm} = k_{ij} \sum_1^{qz} E_{fm}.$$

Число участков, на которое был разделен приемник, равно u . Складывая значения т. э. д. с. для всех участков приемника по всему пятну, получаем

$$\sum_1^u \sum_1^{qz} e = \sum_1^u k_{ij} \sum_1^{qz} E_{fm}.$$

Суммирование величины k_{ij} по площади приемника дает общую чувствительность всего приемника

$$K = \sum_1^u k_{ij}.$$

Суммирование освещенности в отдельных участках пятна по всему пятну дает общий лучистый поток в пределах данной площадки

$$P_x = \alpha \beta \sum_1^{qz} E_{fm}.$$

Значение P_x определяется из серии измерений, как

$$P_x = \frac{\sum_1^u \sum_1^{qz} e_{ijfm}}{\sum_1^u k_{ij}} \alpha \beta = \frac{\sum_1^u \sum_1^{qz} e_{ijfm}}{K} \alpha \beta. \quad (1)$$

Конечный вид данного выражения не изменится, если освещенность на поверхности пятна и чувствительность по поверхности приемника будут постоянны.

$$P_x = \frac{e_{ij} M}{K} \alpha \beta. \quad (1a)$$

При выполнении измерений действительный порядок суммирования т. э. д. с. несколько отличен от указанного выше в силу того, что отдельные спай или участки приемника фактически не могут быть выделены. Практически суммирование ведется следующим образом.

Термостолбик устанавливается в некотором среднем положении, симметрично относительно светового пятна. Измерения ведут при смещении приемника по горизонтали (через α), поочередно в одну и другую сторону, вплоть до нулевого значения т. э. д. с. Пройдя полностью данную горизонталь и возвратив термостолбик в исходное среднее положение, перемещают его вверх или вниз на величину β и повторяют смещение по горизонтали. Смещение по вертикали также ограничивается нулевыми значениями т. э. д. с.

При любом неизменном вертикальном положении приемника каждое измерение для отдельных точек по горизонтали дает величину

$$\sum_1^n e_{ijfm} \quad (2)$$

Сложение этих величин по горизонтали дает величины

$$\sum_1^h \sum_1^g e_{ijfm} \quad (2a)$$

Дальнейшее суммирование по вертикали приводит к выражению

$$\sum_1^h \sum_1^{az} e_{ijfm} \quad (2б)$$

на основании которого затем и вычисляется лучистый поток по той же формуле (1).

Точность определения лучистой мощности при этом способе измерений ограничивается предположениями о постоянстве чувствительности приемника и освещенности в пятне внутри выделенных участков размером $\alpha\beta$. При выборе достаточно малых значений α и β это предположение не может быть далеко от истины.

Известным недостатком предложенного способа является большое число измерений. Опытным путем, однако, следует установить допустимые пределы для величин обоих шагов α и β и возможное сокращение числа измерений.

Способ измерений лучистого потока посредством суммирования отнюдь не следует смешивать с обычным усреднением освещенности на площадке путем отдельных измерений в различных точках освещенного пятна. В последнем случае для определения лучистой мощности необходимо, кроме измерений т. э. д. с., измерять и размеры освещенного участка, что не всегда легко и возможно. Достоинство же предлагаемого способа состоит именно в исключении необходимости точно измерять размеры как светового пятна, так и щели или приемной поверхности самого приемника. Несущественными оказываются и возможные отступления пятна от правильной геометрической формы. Они учитываются непосредственными измерениями. Все геометрические измерения сводятся здесь к отсчету длин или «шагов» перемещений. Эти величины должны измеряться с возможно малой погрешностью.

В приведенном выводе не учитывалась возможность изменения чувствительности отдельных участков приемника в зависимости от степени нагрева (освещения) других спаев и участков. Между тем, в силу взаимного теплового влияния отдельных элементов приемника такие измене-

ния могут иметь место. Отсюда возникает вопрос о возможности применения в конечном выражении для лучистого потока, определяемого в условиях неравномерного и неполного освещения термодетектора, того же самого значения общей чувствительности, которое получено при проверке приемника по полю равномерной энергетической освещенности.

Рассмотрим приемник, состоящий из n спаев. Реакция каждого из них обусловлена степенью нагрева спаев при данной падающей на него лучистой мощности. С другой стороны, приращение температуры спаев зависит не только от падающего на него лучистого потока, но и от теплового взаимодействия всех спаев за счет теплопроводности и собственного излучения. Обозначая через k_i долю общей чувствительности приемника, приходящуюся на соответствующий спай, считаем, что эта величина полностью характеризует его действие, т. е. рассматриваем k_i как сумму

$$k_i = c_{i1} + c_{i2} + \dots + c_i + \dots + c_{in},$$

где c_i — чувствительность самого спаев, а остальные члены характеризуют чувствительность других спаев приемника, обусловленную воздействием на них данного спаев.

Общая чувствительность приемника $K = \sum_1^n k_i$; ее значение определяется при градуировке по полю равномерной освещенности

$$K = \sum_1^n k_i = \frac{e_0}{E}.$$

При последовательном смещении отдельных спаев по освещенной площадке, притом в условиях неравномерного распределения на ней освещенности, измеренные значения т. э. д. с. от всего приемника будут равны

$$\begin{aligned} e_1 &= k_1 E_1 \\ e_2 &= k_1 E_2 + k_2 E_1 \\ &\dots \\ e_n &= k_1 E_n + k_2 E_{n-1} + \dots + k_n E_1 \\ e_{n+1} &= k_1 E_{n+1} + k_2 E_n + \dots + k_n E_2 \\ &\dots \\ e_m &= k_1 E_m + k_2 E_{m-1} + \dots + k_n E_{m-n+1} \\ e_{m+1} &= k_2 E_m + \dots + k_n E_{m-n+2} \\ &\dots \\ e_f &= k_n E_m \\ e_{f+1} &= 0 \end{aligned}$$

$$\sum e_i = k_1 \sum_1^m E_i + k_2 \sum_1^m E_i + \dots + k_n \sum_1^m E_i = \sum_1^n k_i \cdot \sum_1^m E_i.$$

Таким образом, значение общей чувствительности приемника остается равным полученному при определении ее по полю равномерной освещенности. Конечное выражение для суммы электродвижущих сил совпадает с полученным ранее (26).

Для проверки вышеприведенных выводов и последующего применения предложенного способа измерений необходимо иметь особое устройство, с помощью которого можно было бы осуществлять незначительные перемещения термодпар и одновременно измерять эти перемещения с большой точностью. Это устройство должно вполне надежно обеспечивать при всех искусственных перемещениях определенное расположение приемника по отношению к световому пятну (например, строго в одной вертикальной плоскости). Изготовленное для этой цели устройство представлено на рис. 2. Установочный столик 4 для термодпар 3 укреплен на тяжелом штативе 1, по высоте которого он может

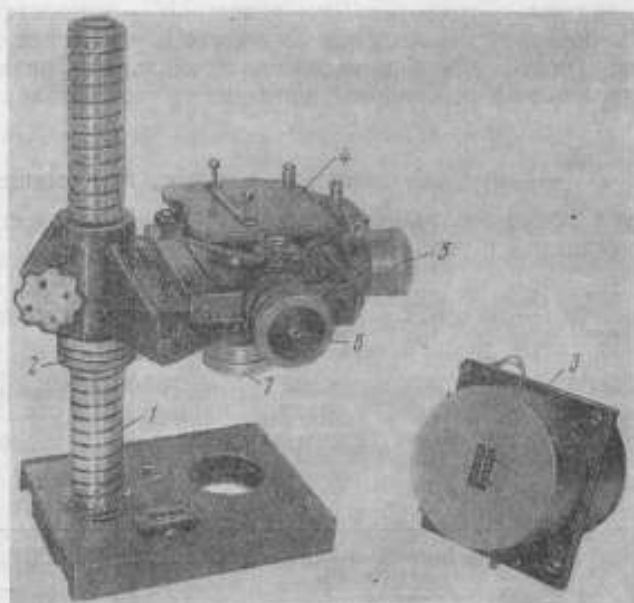


Рис. 2. Устройство для перемещения термодприемника.

перемещаться посредством шайбы 2 с одновременным поворотом вокруг вертикальной оси. Для точных перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях служат микрометрические винты с барабанами 5—7. Шаг винта составляет 0,5 мм; окружность барабана разделена на 200 делений, что дает цену деления в 0,0025 мм. Величина перемещений на всех трех барабанах около ± 20 мм; ошибку на длине винта в 30—40 мм можно принять равной 0,1—0,05 мм. Такая точность изготовления при величинах α и β , равных 0,1 и 1,0 мм соответственно, дает возможность измерять шаги α и β с погрешностью не более 0,2—0,1%.

Для точной установки приемника столик снабжен, кроме того, приспособлением для наклона в двух взаимно перпендикулярных направлениях и для плавного поворота вокруг вертикальной оси в пределах $\pm 6^\circ$.

С помощью данного устройства было выполнено несколько нижеописанных опытов по проверке предложенного способа измерений и непосредственно для измерений лучистой мощности на выходе из монохроматора.

Проверка в условиях равномерной освещенности

Термостолбик освещался через щель, установленную непосредственно перед ним. Площадка за щелью была освещена равномерно по всей поверхности. Размеры этой площадки ($3,8 \times 15,6 \text{ мм}^2$) были таковы, что при смещении термостолбика в некоторых пределах поверхность его ($1 \times 8 \text{ мм}^2$) могла оставаться полностью освещенной. С целью сокращения числа необходимых измерений проверка в этом случае производилась по измерениям потока не на всей освещенной площадке, а лишь на участках ограниченных размеров Dh' — при горизонтальных перемещениях термостолбика и Hd — при вертикальных. Данные обозначения совпадают с приведенными выше; h' — относится к случаю неполного освещения термостолбика по высоте и указывает освещенную долю его поверхности. Величины, пропорциональные указанным потокам, определялись при различных положениях термостолбика двояким образом:

1) $KP_{cp} = \frac{\sum e}{n}$ — среднее значение т.э.д.с. при смещении термостолбика в тех пределах, при которых освещенная часть его приемной поверхности остается неизменной;

2) $KP_{\Sigma} = \sum_1^q e_i \frac{\alpha}{D}$ или $KP_{\Sigma} = \sum_1^z e_i \frac{\beta}{H}$ — при полном смещении термостолбика поперек или вдоль освещенной площадки. Полученные результаты приведены в табл. 1, откуда видно, что согласованность измерений обоими способами лежит полностью в пределах точности измерений.

Таблица 1

Положение термостолбика	Освещенная доля поверхности термостолбика	Шаги смещения, мм		Лучистые потоки		
		α	β	KP_{cp}	KP_{Σ}	$\frac{P_{\Sigma}}{P_{cp}}$
1	h_1	0,25	—	81,4	81,5	0,99 ₉
2	h_2	0,25	—	157,0	156,2	0,99 ₅
3	h_3	0,25	—	231,8	231,0	0,99 ₇
4	h	—	1	281,9	282,3	1,00 ₁
5	h	—	1	283,5	285,1	1,00 ₆

Проверка в условиях неравномерной освещенности

Установка была собрана по схеме рис. 3, где AB — источник света — лампа накаливания, прикрытая молочным стеклом; диаметр наложенной на стекло диафрагмы около 20 мм; CD — отверстие в непрозрачном щитке диаметром 10 мм и площадью S_0 ; L и l — расстояния до места расположения термоспаев от молочного стекла и от щитка CD , равные соответственно 2500 и 70 мм. При таком расположении энергетическая освещенность в плоскости спаев термостолбика имеет постоянное значение E , лишь в средней части освещенного участка; по краям этого

участка наблюдается кольцеобразная полутень, где освещенность спадает до нуля. При этом равномерно освещенная площадка и площадь распространения полутени составляли соответственно около 74,1 и 18,1 мм².

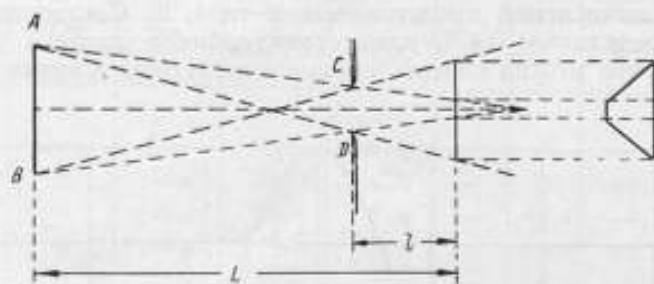


Рис. 3. Схема установки для получения неравномерной освещенности.

Принимая яркость источника света одинаковой во всех точках и считая его по размерам точечным, находим, что поток, упавший на площадку, где расположены спай, равен:

$$P = E_s \frac{L^2}{(L-l)^2} S_0. \quad (3)$$

Измерения лучистого потока были произведены сначала по способу смещений. Шаги смещения и по высоте, и по горизонтали равнялись 1 мм. Конечное значение потока лучистой мощности получено в результате суммирования около 120 измерений. В некоторых условных единицах оно составило 150,5.

После этих измерений щит с отверстием CD был снят и среднее значение энергетической освещенности E_s было измерено в 10 точках, смещенных относительно друг друга в пределах около ± 5 мм.

Величина лучистого потока была вычислена по формуле (3) и составила в тех же условных единицах 149,5. Расхождение с первым итогом оказалось, таким образом, около $\pm 0,3\%$, что лежит полностью в пределах точности измерений.

При этих измерениях был использован термостолбик с круглой приемной поверхностью диаметром около 15 мм.

Измерения потока лучистой мощности на выходе монохроматора

Измерения производились для длины волны 720 мкм тремя различными термостолбиками; один из них применялся с двумя щелями. Чувствительность всех термостолбиков определялась отдельно при освещении их лампой с известной силой излучения. На рис. 4 приведены кривые 1 и 2 зависимости т. э. д. с. от горизонтального смещения одного из термостолбиков для двух раскрытий щели (термостолбик из сплавов висмута, раскрытия щели в 1 и 0,5 мм). На рис. 5 кривые 1, 2, 3 и 4 дают соответственно для термостолбиков, указанных в табл. 2,

зависимость величины $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q e_{ijm}$ от вертикального смещения. Площади

этих кривых представляют собой величины $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q e_{ijm}$. Значение изме-

ренной мощности вычисляется посредством умножения этих площадей на произведение $\alpha\beta$ и последующего их деления на величину чувствительности каждого термостолбика $\sum_1^{11} k_{ij}$. Результаты выполненных измерений и вычислений представлены в табл. 2. Согласованность их лежит в пределах $\pm 0,4\%$ для термостолбиков разного устройства и размеров, что можно считать вполне удовлетворительным.

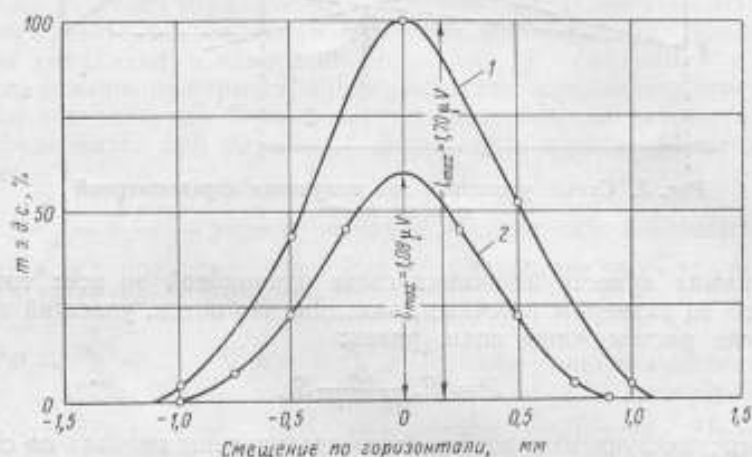


Рис. 4. Зависимость т.з.д.с. приемника от смещения по горизонтали.

Таблица 2

Порядковые номера входов рис. 5	Условное обозначение термостолбиков	Материал спаев	Размеры приемной поверхности, мм	Шаги смещения, мм		Чувствительность для $\mu V/cm$	$\sum \Sigma e_{ij} m$, μV	$\alpha\beta \sum \Sigma e_{ij} m$, $мкВ \cdot м^2$	Лучистая мощность, $мкВт$
				α	β				
1	BC-BO	Висмут-сурьма — висмут-олово	3×12	0,25	1	7,6	$140_{,8}$	$352 \cdot 10^{-7}$	$4,6_a$
2	KM	Константан-манганин	$1,25 \times 8,4$	0,1	1	$4,7_4$	$220_{,2}$	$220_{,2} \cdot 10^{-7}$	$4,6_b$
3	BC-BO-1	Висмут-сурьма — висмут-олово	1×8	0,1	1	$3,3_4$	$155_{,8}$	$155_{,8} \cdot 10^{-7}$	$4,6_1$
4	То же	То же	$0,5 \times 8$	0,1	1	$1,9_2$	$90_{,8}$	$90_{,8} \cdot 10^{-7}$	$4,7_0$

Для добавочного контроля полученных результатов и проверки правильности выбранных значений шагов перемещения α и β служит табл. 3. В ней приведены вычисленные для различных шагов смещения площади тех кривых, которые представлены на рис. 4 и 5. Из этой таблицы видно, что число измерений в ряде случаев может быть значительно сокращено.

Таблица 3

Шаги смещения, мм		Значение $\Sigma \epsilon_{ij}$ для термосталбиков, мкВ				Отклонение от суммы при минимальном значении шага, %			
α	β	BC-BO	KM	BC-BO-1		BC-BO	KM	BC-BO-1	
				щель 1 мм	щель 0,5 мм			щель 1,0 мм	щель 0,5 мм
0,05	—	—	—	16,0 ₀	8,3 ₀	—	—	—	—
0,1	—	—	21,1 ₈	16,1 ₀	8,2 ₀	—	—	+0,1	-0,2
0,2	—	—	21,1 ₇	16,0 ₇	8,2 ₀	—	-0,4	-0,1	-0,2
0,3	—	—	21,1 ₆	16,1 ₀	8,3 ₀	—	-0,9	+0,1	+0,6
0,4	—	—	21,1 ₈	16,0	8,2 ₃	—	0,0	-0,6	-0,8
0,5	—	—	21,1 ₈	15,9	8,1 ₈	—	0,0	-1,2	-1,4
—	1,0	352,1 ₂	220,1 ₂	155,1 ₈	90,1 ₃	—	—	—	—
—	2,0	351,1 ₀	219,1 ₀	156,1 ₁	89,1 ₅	-0,1	-0,3	+0,2	-0,9
—	3,0	352,1 ₇	220,1 ₄	155,1 ₄	88,1 ₅	+0,1	+0,1	-0,3	-2,0
—	4,0	345,1 ₆	201,1 ₈	156,1 ₇	88,1 ₂	-1,9	+0,7	+0,6	-2,3

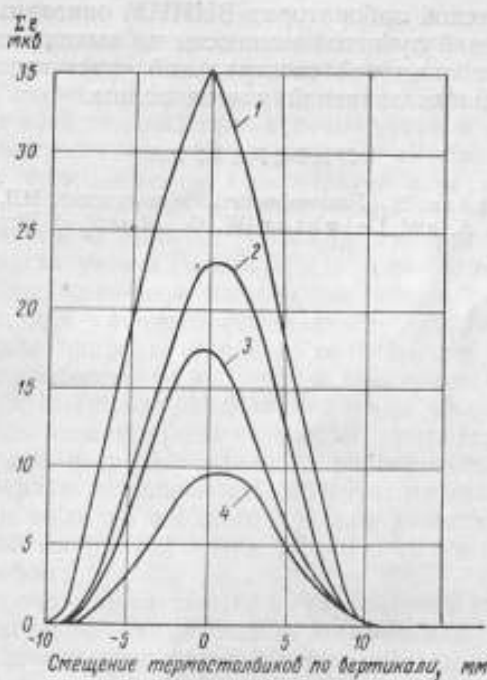


Рис. 5. Зависимость сумм т.э.д.с., полученных при горизонтальных смещениях, от смещения по вертикали.

Хорошие результаты опытной проверки описанного способа измерений дают основание считать возможным расширение его применения и для других случаев, кроме измерения спектральной мощности излучения. Применение его может быть признано целесообразным там, где

требуется точное определение лучистого потока в условиях неравномерной освещенности, неодинаковой чувствительности и неопределенных размеров и формы освещенного участка.

Можно также предположить, что данный способ применим в подобных случаях и для приемников другого вида, например фотоэлементов.

Заклучение

Предложенный способ позволяет измерять поток лучистой мощности в пучке малого сечения независимо от характера распределения освещенности по сечению пучка и чувствительности по поверхности приемника.

Способ состоит в измерении значений т. э. д. с. при последовательных смещениях приемника по всей площади освещенного пятна, причем смещения выполняются через равные и известные промежутки. Величина этих промежутков является единственной, подлежащей линейным измерениям.

Значение лучистого потока определяется как

$$P_x = \frac{1}{K} \sum_{ijfm} \alpha \beta.$$

В фотометрической лаборатории ВНИИМ описанный способ применяется для измерений лучистой мощности на выходе из монохроматора при определении абсолютной спектральной чувствительности фотоэлементов для отдельных значений длины волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майер А., Зейтц Э. Ультрафиолетовое излучение, ИЛ, М., 1952.
2. Leighton P. A. and Leighton W. G., «Journ. of Phys. Chemistry», № 7, 1932, pp. 1882—1907.

Поступила в редакцию
7/1 1960 г.

Т. Н. АНДРЕЕВА, В. Е. КАРТАШЕВСКАЯ,
С. П. СКАЧКОВА

ВНИИМ

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ СЕЛЕНОВЫХ ЛЮКСМЕТРОВ

Статья содержит описание разработанной и осуществленной во ВНИИМ новой установки, предназначенной для поверки объективных люксметров технического назначения.

Широкое применение селеновых люксметров в органах инспекции и охраны труда, в сельском хозяйстве, в светотехнической промышленности и других областях народного хозяйства обуславливает потребность в периодической поверке большого числа таких приборов. Необходимость разрешения этой задачи стала особенно острой в последние годы, с начала выпуска люксметров Ю-16 заводом «Вибратор». Селеновые люксметры — или фотоэлементы с измерительным прибором — выпускаются, кроме того, и другими предприятиями страны (Кино-электро-механическим заводом в Москве, Киевским заводом электроприборов, Агрофизическим институтом в Ленинграде); в плане завода «Вибратор» на ближайшие годы намечены разработки новых типов люксметров (малогабаритного, для уличного освещения и лабораторного).

Как технические приборы широкого потребления и невысокой точности (5—15%) люксметры нуждаются в простой и быстрой поверке, обеспечивающей при ее выполнении разумно выбранные пределы погрешностей. Для осуществления поверки люксметров любого вида необходимо в первую очередь создать на рабочем поле измерительной установки равномерную освещенность, которую можно плавно и непрерывно изменять от нуля до верхнего предела данного прибора; освещенность в каждой выбранной точке шкалы должна определяться тем или другим способом.

Эти условия хорошо выполняются на светомерной скамье с помощью образцовых светоизмерительных ламп накаливания [1]. Однако для обычных рабочих люксметров такая поверка оказывается неоправданно трудоемкой по времени как измерений, так и последующих расчетов, а получаемая довольно высокая точность измерений практически не используется вследствие недостаточной устойчивости селеновых фотоэлементов. Кроме того, этот способ поверки требует сравнительно сложных светоизмерительных установок и большого помещения; он не может быть широко применен в областных поверочных лабораториях, где такое оснащение в настоящее время было бы нецелесообразным. Для поверки технических приборов — рабочих люксметров — необходимо поэтому

создать отдельную поверочную установку упрощенного типа. Наиболее простым решением представляется осуществление ее в виде осветительного устройства, с помощью которого может производиться сравнение показаний двух люксметров: образцового и поверяемого.

Оставляя пока в стороне вопрос о создании и поверке образцового люксметра, следует рассмотреть подробнее основные требования, предъявляемые к упрощенной поверочной установке, и причины, которыми они обусловлены. Как правило, установка должна обеспечивать возможность поверки всех люксметров серийного производства, применяющихся в стране. Отсюда вытекают следующие условия:

1. Одинаковая освещенность на рабочей поверхности должна быть создана по всей площади расположения фотоэлементов — поверяемого и образцового. Соблюдение этого требования снижает погрешность поверки, обусловленную неоднородной чувствительностью фотоэлементов, в особенности существенную при неодинаковых размерах и формах их приемной поверхности.

2. Изменение освещенности в установке должно совершаться непрерывно от нуля до максимума в пределах заданных значений. Условие это необходимо для осуществления поверки по целым оцифрованным делениям шкал приборов.

3. С целью использования одной и той же установки для поверки разных типов люксметров должны быть предусмотрены сменные специальные приспособления и возможность расположения различных фотоэлементов в одной плоскости на рабочей площадке.

4. С той же целью пределы измерений должны в случае надобности легко расширяться. Измерительный прибор образцового люксметра должен иметь запас чувствительности для измерения малых освещенностей; в самой установке должен быть запас мощности и возможность уменьшения расстояний для повышения освещенности.

5. Установка должна быть возможно более простой по устройству и в работе; желательно, чтобы она не содержала каких-либо узлов или частей, подлежащих поверке. Единственным прибором, проходящим предварительную независимую поверку, должен быть образцовый люксметр, путем сравнения с которым производится поверка рабочих люксметров.

В недавние годы упрощенная установка для градуировки селеновых люксметров в условиях производства [2] была разработана Ленинградским институтом охраны труда, а затем усовершенствована в конструктивных деталях на заводе «Вибратор». Отвечая своему назначению — градуировке, а также отбраковке и регулировке люксметров в условиях производства, эта установка не удовлетворяет перечисленным выше требованиям.

Установка завода «Вибратор» предназначена исключительно для люксметров Ю-16, и как-либо приспособить ее для других типов приборов невозможно без существенных конструктивных переделок. Эта оговорка относится не только к размещению приборов. Наиболее существенным препятствием к каким-либо видоизменениям является резко неравномерное распределение освещенности на рабочем поле.

Изменение освещенности в установке завода «Вибратор» — ступенчатое, по оцифрованным делениям шкалы люксметра Ю-16. Таким образом, установка не позволяет поверять приборы точно по их делениям; посредством ее можно лишь констатировать, находятся ли показания прибора, притом именно прибора указанного типа, в установленном допуске или они выходят за его пределы.

Помимо образцового люксметра, по которому ведется настройка установки завода «Вибратор», поверке подлежит еще один узел самой установки: набор серых стеклянных поглотителей, дающих ступенчатое изменение освещенности. Эта поверка, достаточно сложная, заметно затрудняет применение данного типа установок, в особенности с увеличением их числа. Кроме того, применение поглотителей может привести к дополнительным погрешностям: за счет влияния многократных отражений при попарном использовании стекол, установленных в соосных дисках вблизи друг от друга; за счет загрязнения и повреждения поверхности стекол; за счет их неполной нейтральности. Приведенные соображения заставили отказаться от мысли использовать установку завода «Вибратор» для поверки люксметров в органах Комитета.

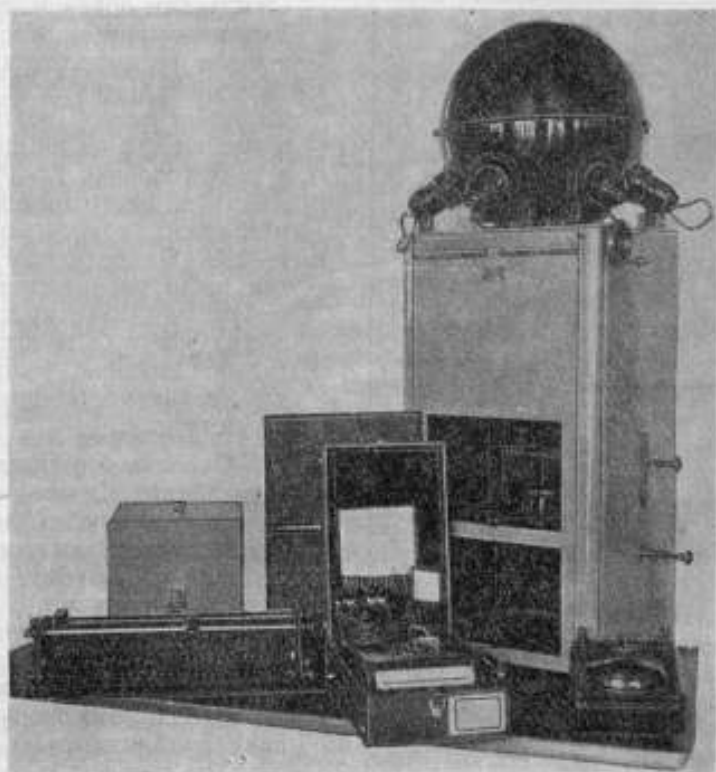


Рис. 1.

Исходя из требований, поставленных для поверочной установки общего назначения, во ВНИИМ по предложению проф. П. М. Тиходева была сконструирована новая установка для поверки люксметров по методу сличения. Установка представляет собой устройство для создания переменной освещенности на приемной поверхности двух фотоэлементов. Внешний вид и разрез установки представлены на рис. 1 и 2. Основными ее частями являются: осветитель в виде полого металлического шара 1, выкрашенного с внутренней стороны белой матовой краской и содержащего в нижней полусфере шесть ламп накаливания; раздвижная щель 3 с прямоугольно срезанными сторонами и направляющие 5, 10 с каретками 4, 9 для крепления поверяемого и образцового фотоэлементов.

Осветитель — съемный; в нижней части имеется отверстие, расположенное непосредственно над раздвижной щелью и центрированное с ней и с вертикальной осью всей установки. Лампы накаливания установлены в съемных цилиндрических патрубках осветителя таким образом, что внутри шаровой поверхности находится лишь купол колбы.

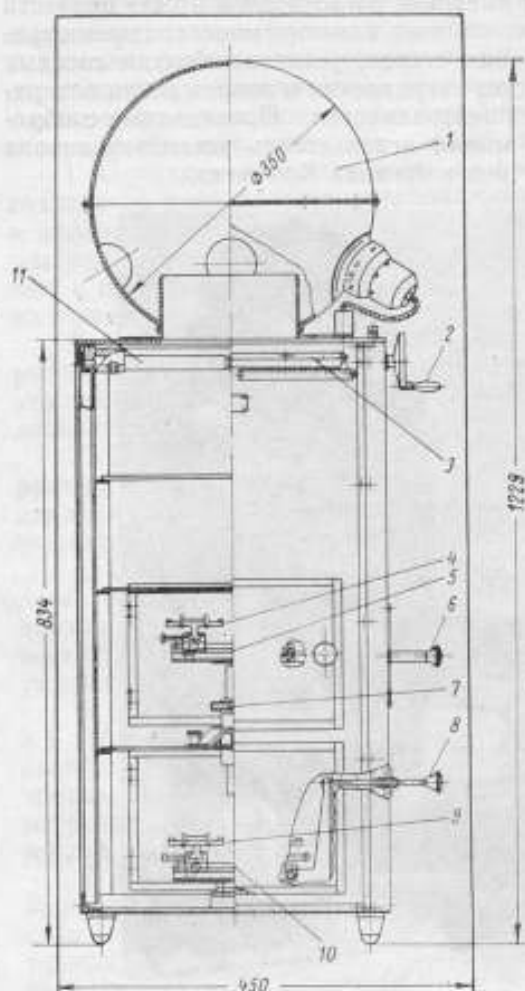


Рис. 2.

Кроме того, цилиндрический козырек окружает отверстие и препятствует прохождению через него прямого света от ламп накаливания.

Освещенные рабочие площадки, где располагаются фотозащиты, создаются, таким образом, только отраженным светом. Неравномерность в распределении горизонтальной освещенности при смещении от осевой вертикальной линии на ± 2 см не превышает в этих условиях 2—3%, а для участков, расположенных симметрично относительно оси, 1—2%. От величины раскрытия щели распределение освещенности зависит мало, и всегда могут быть экспериментально найдены участки, где эта зависимость практически отсутствует.

Окраска осветителя выполнена белой матовой светотехнической эмалью (№ 15, разработана во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте), нанесенной путем распыления. Цветовая температура излучения, выходящего из отверстия шара, изменяется (в сторону понижения) приблизительно на 40—50° К по сравнению со значением, определенным для открытой лампы.

В осветителе устанавливаются осветительные лампы накаливания 40—100 вт. С помощью переключателя, находящегося на верхней панели, могут включаться все шесть ламп одновременно или по три. Для получения освещенностей до 500 лк и несколько более достаточно применять три лампы по 100 вт. Питание осветителя может производиться от аккумуляторов или от сети переменного тока со стабилизатором. Установка снабжается вольтметром класса 0,2 и регулировочными реостатами. Поддержание постоянства напряжения имеет значение в основном при поочередном способе сличения (см. ниже) с образцовым прибором основной шкалы поверяемого люксметра и при проверке поглотителей. В способе одновременного сличения требования к постоянству напряжения несколько снижаются.

Раздвижная щель служит для плавного изменения освещенности на рабочих площадках. Она раскрывается с помощью рукоятки 2 и винта 11 симметрично относительно отверстия шара. Степень раскрытия может отмечаться на боковых линейках по указателям, связанным с подвижной частью щели. Изменение освещенности приблизительно пропорционально площади раскрытия щели и поэтому возрастает неравномерно с перемещением указателя.

В дополнение к плавному изменению освещенности посредством раздвижной щели ступенчатое изменение освещенности дает размещение фотоэлементов на верхней или нижней площадке. Верхняя площадка может, кроме того, перемещаться вертикально посредством винта 7 в пределах около 10 см. Нижняя площадка служит для поверки при малых значениях освещенности (до 100 лк), верхняя — при больших значениях (до 500 лк и выше); пределы измерений на обеих площадках перекрываются.

В принципе, использованном в данной установке для создания переменной освещенности, можно усмотреть некоторое сходство с устройством, предложенным в свое время С. О. Майзелем [3] для градуировки зрительного фотометра. Источником света в этом устройстве был излучатель равномерной яркости в виде молочного стекла, освещенного с обратной стороны симметрично расположенными лампочками и отраженным светом от окружающей их белой камеры. Изменение освещенности на приемной поверхности создавалось с помощью ирисовой диафрагмы, установленной непосредственно перед молочным стеклом.

В установке ВНИИМ при совершенно отличном конструктивном выполнении также применен источник света в виде поверхности приблизительно равномерной яркости, причем величина этой поверхности может изменяться непрерывно. Как можно предполагать, в силу более совершенных диффузных свойств шарового осветителя по сравнению с молочным стеклом и, вероятно, более совершенного механического выполнения раздвижной щели (микрометрический винт с шагом 2 мм) по сравнению с присовой диафрагмой, в установке ВНИИМ, вероятно, может быть получена большая равномерность в освещенности на рабочей площадке и большая устойчивость измерений.

Поверяемый и образцовый фотоэлементы в установке ВНИИМ крепятся на отдельных каретках, установленных на одной направляющей в одной горизонтальной плоскости. Каретки — сменные, различного вида для разных фотоэлементов и для поверки последних при освещении, перпендикулярном к поверхности и под углом 30°. Каждая из кареток может независимо от другой сдвигаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях — для проверки равномерности освещения и определения лучшего положения — и закрепляться в том или другом месте стопорными винтами. Рычаги 6 и 8 позволяют перемещать одновременно обе каретки по направляющим 5 и 10. При условии определенного взаимного расположения обеих кареток перемещение этих рычагов между двумя крайними их положениями обеспечивает поочередное возвращение кареток на одно и то же место на оси, соединяющей центр отверстия шарового осветителя и раздвижной щели.

Соответственно сказанному выше, поверку люксметров можно производить двумя способами — путем одновременного или путем поочередного сличения с образцовым. В первом случае для исключения возможной остаточной неравномерности в распределении освещенности поверку следует производить, меняя местами оба фотоэлемента, причем на поверяемом приборе в обоих положениях устанавливается одно и то же показание.

При условии достаточной устойчивости ламп осветителя и при введении некоторых усовершенствований и дополнений к отсчетному устройству щели установку можно градуировать по образцовому люксметру и пользоваться этой градуировкой для поверки приборов в течение нескольких часов непрерывной работы.

Поверка поглотителей, служащих для расширения пределов измерений люксметров, производится сличением с поглотителями образцовых приборов. Поверяемый и образцовый фотоэлементы (или какой-либо другой) располагаются рядом. Один из них, покрытый вспомогательным поглотителем, не участвующим в измерениях, нужен для наблюдения за постоянством освещенности во время связанных между собой измерений; второй служит для относительных измерений ослабления поверяемого поглотителя и покрывается поочередно поглотителем поверяемым и образцовым.

Подробности условий поверки и расчета содержатся в инструкции, прилагаемой к установке.

Таким образом, осуществленное осветительное устройство дает возможность непрерывного изменения освещенности в пределах от 0 до 500—600 лк с регулировкой до 0,1—0,05% и обеспечивает равномерность в распределении освещенности не хуже чем в 2—3%. Осветительное устройство не содержит никаких узлов, подлежащих поверке, кроме общей проверки правильности сборки и качества изготовления. Применяя, кроме того, определенную методику измерений (перестановку фотоэлементов, чередование отсчетов во времени и др.), вероятно, можно считать исключенной возможность появления при измерениях систематических погрешностей, зависящих от самой установки.

Точность измерений ограничивается в основном лишь применением при поверке образцового люксметра в виде селенового фотоэлемента, подобного поверяемому. Пока еще нет специально разработанных измерительных типов селеновых фотоэлементов; существующие образцы, изготовленные обычно по очень сходной методике, сравнимы по качеству. Поэтому выбор селеновых фотоэлементов для образцовых люксметров, служащих для поверки рабочих, пришлось осуществить посредством отбора наиболее устойчивых фотоэлементов. Для десяти установок, распределенных среди управлений Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, из общего числа тридцати, изготовленных заводом «Вибратор», было отобрано по два фотоэлемента для каждой установки. На протяжении полугодия эти фотоэлементы дважды прошли полное испытание на светомерной скамье по образцовым светоизмерительным лампам. В результате поверки самые устойчивые были отобраны для поверочных установок. Два прибора к каждой установке даны для повышения надежности работы последних. Согласованность их показаний должна лежать в пределах 2—4%. В инструкции, прилагаемой к установке, дано указание о периодической поверке образцовых люксметров на светомерной скамье не реже одного раза в полгода, а в случае необходимости, при расхождении двух приборов, превышающем указанные выше значения, — и чаще.

Образцовые люксметры установки снабжены в качестве измерителя микроамперметром М95 с основными пределами шкалы в 1,0 и 10 мка и с шунтом до 1000 мка. Внутреннее сопротивление этого прибора при работе фотоэлементов Ф102 на освещенностях 5÷500 лк (шунты на 50, 100 и 500 мка) лежит в пределах 160±16 ом.

Наибольшее сопротивление прибора при шунтах 1 и 10 мка равно 730 ом.

Микроамперметры этого типа выбраны в целях последующего расширения пределов измерений, поверки люкметров различных типов и повышения точности измерений поглотителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тиходеев П. М., Испытание, поверка и применение люкметров, Всесоюзный комитет стандартизации при Совете труда и обороны, «Стандартизация и рационализация», № 112, Л.—М., 1932.
2. Бутилев А. А., Фотометрические установки для поверки люкметров в условиях производства, «Светотехника», № 10, 1957, стр. 8—10.
3. Майзель С. О., Освещенность от больших поверхностей и применение их в фотометрии, Труды ГОИ, т. III, вып. 16, 1923, стр. 24—26.

Поступила в редакцию
4/1960 г.

Е. Н. ЮСТОВА

ВНИИМ

ВИЗУАЛЬНЫЙ КОЛОРИМЕТР ВНИИМ

В статье дано описание устройства и результатов исследования образцового колориметра ВНИИМ, конструктивные особенности которого делают его пригодным для выполнения научно-исследовательских и поверочных работ, требующих высокой точности.

В колориметрии различаются три метода измерения цвета, которые кратко называют визуальный, объективный и расчетный (спектрофотометрический). Особенности этих методов таковы, что хотя они и взаимозаменяемы в практике, но каждому из них соответствуют некоторые условия, в которых применение одного метода предпочтительно перед другими. Из этих трех способов визуальный является исходным в том смысле, что только с его помощью получают так называемые кривые сложения среднего стандартного наблюдателя, положенные в основу применения остальных двух методов. Добавим также, что установление всякого рода допусков по цвету должно основываться на изучении цветоизмерительной способности глаза, т. е. на визуальных измерениях.

Визуальный способ измерения цвета осуществляется чаще всего с помощью оптических приборов — визуальных трехцветных колориметров различных систем. Поэтому во ВНИИМ в 1952—1954 гг. был сконструирован* и изготовлен на заводе «Эталон» колориметр такого типа, предназначенный в качестве образцового прибора для научно-исследовательских и поверочных работ.

Принцип действия и устройство колориметра

Во всех обычных аддитивных колориметрах измеряемый цвет D уравнивается смесью трех основных цветов A , B и C прибора на поле сравнения

$$D = aA + bB + cC. \quad (1)$$

Положительные числа a , b и c определяются по трем шкалам прибора и являются координатами цвета в системе прибора.

* Конструкция прибора была разработана в конструкторском бюро ВНИИМ В. С. Степановым и Т. Н. Брюсовой.

В случае насыщенного цвета его уравнивание достигается только путем разбавления

$$D + \Delta = a'A + b'B + c'C.$$

По существу это означает, что одна из координат измеряемого цвета является отрицательной и векторное равенство может быть переписано в виде

$$D + a''A = b''B + c''C, \quad (2)$$

где все величины a'' , b'' и c'' снова положительны.

Необходимость дополнительного измерения разбавляющего цвета влечет за собой удвоение погрешности измерения насыщенных цветов.

Колориметр ВНИИМ сконструирован таким образом, что в нем могут быть непосредственно осуществлены оба цветовых равенства (1) и (2), т. е. он может быть использован как обычный колориметр и, кроме того, в нем может быть осуществлен прием измерения насыщенных цветов путем переноса одного из основных цветов прибора в пучок измеряемого цвета.

На преимущества такой конструкции обратил в свое время внимание Н. Д. Ньюберг. Этот прием измерения применен также в спектральном колориметре Райта [1], сконструированном для измерения кривых сложения.

На рис. 1 изображена принципиальная схема прибора, а на рис. 2 — его общий вид.

Основные цвета **A**, **B** и **C** осуществляются с помощью цветных светофильтров Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 [равенство (1)] или Φ_1 , Φ_2 и Φ_5 [равенство (2)], помещенных перед лампами S_1 , S_2 , S_3 и S_5 .

Измеряемый цвет **D** может представлять собственный цвет источника S_4 , цвет светофильтра Φ_4 — с источником S_4 или цвет отражающей поверхности, помещаемой на место экрана \mathcal{E}_2 и освещаемой тем же источником S_4 .

Лампы S_1 — S_5 , прикрытые затенительными щитками $Щ_1$ — $Щ_5$ с отверстиями, перемещаются на тележках по обычным фотометрическим скамьям l_1 — l_5 относительно белых экранов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , на которых происходит сложение цветов. K — колориметрическая головка, в которой заключена оптическая система: два объектива O_1 и O_2 , окуляр O_3 , кубик Льюмера L и прямоугольная призма Π . Эта система позволяет сравнивать измеряемый цвет на экране \mathcal{E}_2 с известным цветом, образованным смесью трех основных цветов на экране \mathcal{E}_1 в случае уравнения (1), или уравнивать сумму двух цветов на экране \mathcal{E}_1 суммой двух других цветов на экране \mathcal{E}_2 [случай (2)].

Отсюда также ясна вспомогательная роль пятой скамьи и ее необходимость в приборе. Однако согласно уравнениям (1) и (2) в измерениях всегда используются только четыре из пяти скамей.

Скамьи расположены под углами друг к другу (рис. 1 и 2). Они снабжены масштабными линейками, а тележки — указателями. Движение ламп может осуществляться либо непосредственно перемещением тележки по скамье, либо с помощью поворота рукояток, связанных с тележками посредством блоков и струнных передач (рис. 2). Рукоятки снабжены оцифрованными барабанами и отсчетными шкалами. В защитной коробке B для образцов имеется: помещение для фильтра дневного цвета D , держателя образцов, приспособление ψ для поворота образца под различными углами к направлению падения света и направлению наблюдения, а также рамка P для закрепления и перемещения малых прозрачных образцов, например киноленты.

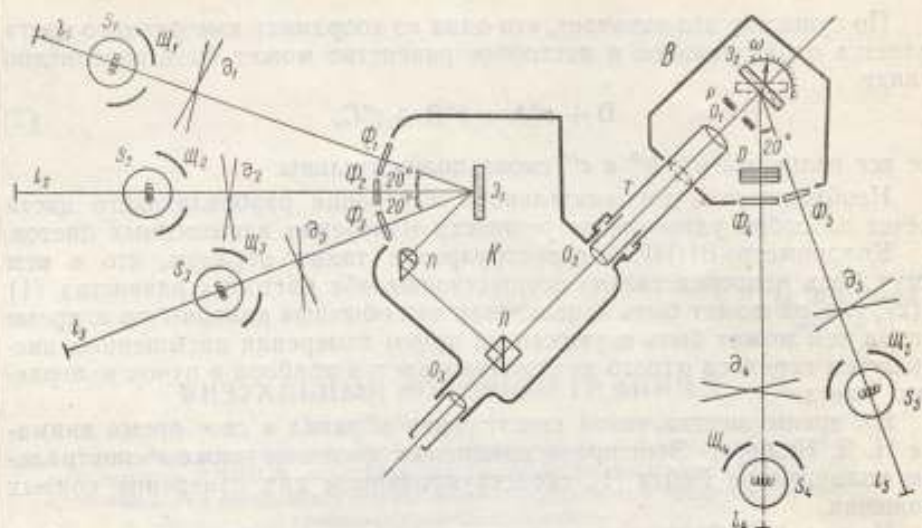


Рис. 1. Оптическая схема колориметра ВНИИМ.

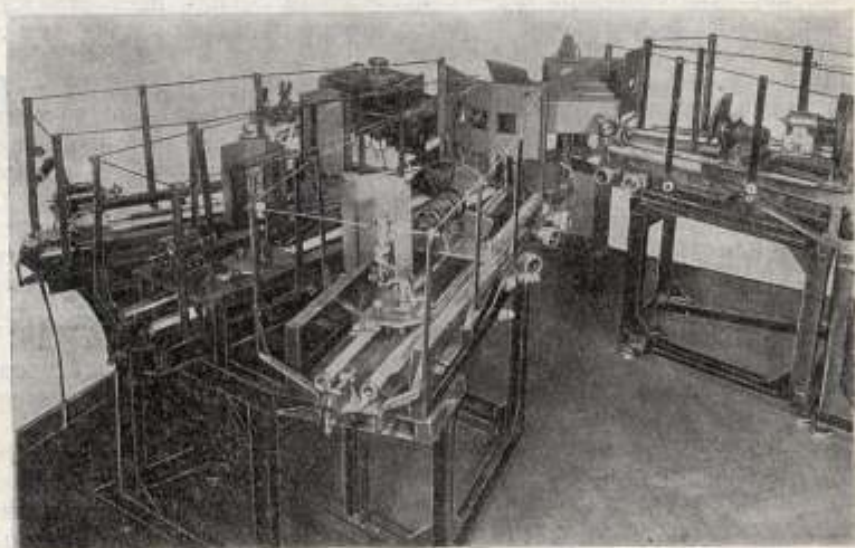


Рис. 2. Внешний вид колориметра ВНИИМ.

Для измерения малых образцов имеется съемный микрообъектив O_1 , который в случае надобности ввинчивают в наружный конец соединительной трубки T (объектив O_2 при этом вывинчивают). Объектив O_1 снабжен приспособлением для фокусировки.

На рис. 1 $d_1 - d_6$ — вращающиеся секторные диски. Наличие дисков у прибора эквивалентно удлинению фотометрических скамей.

Все пять ламп колориметра соединены параллельно между собой и питаются от сети через стабилизатор СН-2.

Приведем некоторые технические характеристики колориметра.

1. Поле зрения колориметра имеет вид круга с вертикальной границей раздела. Угловой размер поля зрения 10° .

2. Наименьший диаметр измеряемого образца при измерении без объектива составляет 50 мм; при измерении с объективом — 15 мм; при измерении с микрообъективом — 3 мм.

3. Расстояния от ламп до экранов могут изменяться в пределах 40—165 см (рабочая длина скамей — 125 см, расстояние от экрана Э₁ до начала отсчета — 40 см). Отсюда наибольшая освещенность при измерении темных образцов с коэффициентом пропускания 5% и при использовании лампы силой света 600 св составляет около 200 лк.

4. Полный оборот барабана соответствует перемещению указателя тележки на 20 см, а по шкале отсчетного приспособления — на одно деление. Соответственно этому барабан разделен на 200 делений, а на шкале линейки отсчетного приспособления нанесены значения 0, 200, 400, 600, 800, 1000 и 1200. Отсчет по барабану можно прочитать с точностью до 0,5 мм. Система блоков обеспечивает соответствие между показанием барабанов и отсчетом по линейке с точностью до $\pm 0,5$ мм. Мертвый ход при этом отсутствует.

5. Углы поворота образца относительно источника изменяются в пределах 0—45° через 1 градус.

Конструктивные особенности колориметра

Для измерения координат цвета в приборе применяется закон обратных квадратов расстояний. Этот способ, впервые осуществленный в колориметрии Мак Адамом [2] при измерении порогов и независимо П. М. Тиходеевым в шестиконечной скамье [3] и установке для определения кривой видности [4], был использован в данном случае и для колориметра ВНИИМ, так как предполагалось, что он должен дать преимущества в точности. Являясь исходным по отношению к другим фотометрическим приемам изменения интенсивности, он, естественно, был применен в образцовом колориметре.

Существенной особенностью прибора является отсутствие в нем селективных осветителей. Это обстоятельство позволяет применять расчетную градуировку, которая свободна от систематических погрешностей зрения отдельных наблюдателей и не содержит дополнительных погрешностей, неизменно возникающих в любом другом способе градуировки [5] как по трем цветам, так и по четырем цветностям.

Следует также отметить, что в конструкции прибора предусмотрены сменные светофильтры, для того чтобы в каждом конкретном случае производить измерения в наиболее благоприятных условиях. Как известно, малая точность измерения белых и слабо насыщенных цветов на трехцветных колориметрах в основном обусловлена следующей причиной. Насыщенные основные цвета, которые, как правило, применяются в этих приборах с целью максимального охвата области цветов, изме-

ряемых без разбавления, не позволяют получить ярких полей сравнения. Колориметрирование выполняется на сравнительно низком уровне яркости порядка 0,0025 *сб*, в то время как в жизни все оценки по цвету производятся при более высоком уровне яркости, поэтому в обычных колориметрах не используются все возможности цветоразличительных свойств зрения. Кроме того, применение насыщенных цветов в колориметре приводит при измерении белых цветов к неизбежным систематическим погрешностям вследствие наличия у наблюдателя индивидуальных особенностей зрения, резко проявляющихся при больших различиях спектрального состава полей сравнения. Эти систематические расхождения во много раз превосходят малые цветовые различия, которые отдельный наблюдатель способен воспринять.

Стремление обойти эти трудности мы уже встречаем в модернизированном колориметре ГОИ (1950), к которому прилагается дополнительный набор трех фильтров с менее насыщенными цветами, а также в колориметре Рихтера [6]. Такую же цель преследовал Дональдсон [7] в шестицветном колориметре.

В свое время М. М. Гуревич отмечал, что при уравнивании белого цвета наиболее близкие по спектральному составу поля сравнения должны получаться при комбинации сине-зеленого, желтого и пурпурного цветов.

Следовало ожидать, как это и подтвердилось на опыте, что использование прозрачных светофильтров с пологими спектральными характеристиками даст при измерении белых цветов выигрыш в точности.

На первый взгляд может показаться, что возможность смены светофильтров исключает необходимость применять прибор в варианте (2), так как в наборе образцовых стекол всегда можно выбрать нужные цвета, которые удовлетворяют равенству (1).

На самом деле использование колориметра с определенной тройкой основных цветов в ряде задач совершенно необходимо (например, при измерении кривых сложения), в других же задачах, как например при подборе и контроле цветов для испытательных таблиц, оно является более удобным.

В приборе осуществлены поля зрения большого углового размера — 10° , которые, согласно измерениям Дональдсона [7], Лобановой и Раутиана [8], существенно повышают точность установки колориметрических равенств по сравнению с применяемыми в колориметрии двухградусными полями.

Поле зрения в 10° впоследствии было зафиксировано в рекомендациях Цюрихской конференции Международной осветительной комиссии (МОК) 1955 г. [9].

Конструктивные особенности прибора таковы, что он позволяет измерять:

- 1) координаты цвета цветных источников, например люминесцентных ламп;
- 2) координаты цвета, коэффициенты отражения и пропускания соответственно отражающих и прозрачных материалов;
- 3) кривые сложения цветов и пороги цветоразличения.

Совершенно очевидно, что прибор может быть также использован и для измерения фотометрических величин — силы света, коэффициента яркости, а также цветовой температуры при наличии соответствующих эталонов.

Градуировка колориметра

Как уже упоминалось, одним из существенных преимуществ прибора является то, что его оптическая система допускает возможность применения расчетной градуировки. Упомянем кстати, что такой способ градуировки не только дает выигрыш в точности, но и значительную экономию во времени.

Получению уравнений градуировки предшествует ряд вспомогательных операций — таких, как расчет координат цвета светофильтров по спектрофотометрическим характеристикам и определение цветовой температуры ламп.

При этом удобно, когда все пять ламп воспроизводят заданную цветовую температуру при одинаковом напряжении.

Подбор ламп одинакового напряжения практикуется в колориметре Демкиной и дает выгоды, упрощающие электрическую схему контроля за напряжением, а именно исключает необходимость контроля каждой лампы в отдельности. При параллельном соединении ламп колебания напряжения в сети, как будет далее показано, не влияют на результат цветовых измерений.

Для того чтобы иметь возможность оценить уровень освещенности, на скамью № 4 была помещена лампа с известной силой света.

Характеристики светофильтров в системе МОК определялись по спектрофотометрическим данным, полученным на спектрофотометрической установке с двойной монохроматизацией света и на приборе СФ-2М.

Для получения уравнения градуировки остается необходимым лишь сравнить между собой интенсивности ламп без светофильтров, что при равенстве их цветовых температур можно выполнить путем обычного фотометрирования. Удобно принять интенсивность лампы, освещающей образец на скамье № 4, равной единице. Этим упрощается дальнейшее вычисление коэффициента отражения и пропускания образцов.

Характеристики цветных светофильтров прибора в системе МОК задаются уравнениями:

$$F_1 = \bar{\alpha}_1 X + \bar{\beta}_1 Y + \bar{\gamma}_1 Z;$$

$$F_2 = \bar{\alpha}_2 X + \bar{\beta}_2 Y + \bar{\gamma}_2 Z;$$

$$F_3 = \bar{\alpha}_3 X + \bar{\beta}_3 Y + \bar{\gamma}_3 Z,$$

где $\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i, \bar{\gamma}_i$ — координаты цветов F_1, F_2, F_3 при источнике „А“ в системе МОК, а X, Y, Z — единичные цвета системы.

Умножая цвета F_1, F_2 и F_3 на коэффициенты η_1, η_2, η_3 относительной интенсивности ламп, мы получаем единичные цвета системы прибора, выраженные через единичные цвета системы МОК, т. е. уравнения градуировки:

$$f_1 = \eta_1 F_1 = \bar{\alpha}_1 \eta_1 X + \bar{\beta}_1 \eta_1 Y + \bar{\gamma}_1 \eta_1 Z;$$

$$f_2 = \eta_2 F_2 = \bar{\alpha}_2 \eta_2 X + \bar{\beta}_2 \eta_2 Y + \bar{\gamma}_2 \eta_2 Z;$$

$$f_3 = \eta_3 F_3 = \bar{\alpha}_3 \eta_3 X + \bar{\beta}_3 \eta_3 Y + \bar{\gamma}_3 \eta_3 Z,$$

или

$$f_1 = \bar{a}_1 X + \bar{b}_1 Y + \bar{c}_1 Z;$$

$$f_2 = \bar{a}_2 X + \bar{b}_2 Y + \bar{c}_2 Z;$$

$$f_3 = \bar{a}_3 X + \bar{b}_3 Y + \bar{c}_3 Z,$$

где $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ — координаты единичных цветов f_1, f_2 и f_3 прибора в системе XYZ .

Исследование колориметра

Исследование колориметра включало в себя контрольные измерения цветных образцов с использованием различных систем основных цветов и анализ погрешностей измерения в разных условиях.

а) Измерения в различных областях цветового пространства. Прежде всего прибор был исследован как обычный колориметр с тремя насыщенными цветами — красным, зеленым и синим (система КЗС). На нем были измерены цвета восьми контрольных стекол при источнике света «А» и цвет самого источника (табл. 1).

Результаты измерения были сравнены с расчетными данными и с показаниями других трехцветных колориметров (Демкиной, модель 1934 г., Демкиной, модель 1950 г. и Дональдсона). Измерения были выполнены одним наблюдателем. Расчеты цвета производились по спектральным коэффициентам пропускания стекол, измеренным на спектрофотометре СФ-2.

Таблица 1

Марка	Прибор	Координаты цвета			Число порогов цветности по Мартиниону	Отступления по яркости, $\Delta\tau/\tau^0/0$
		x	y	$\bar{y} = \tau^0/0$		
ЗС-3	ВНИИМ	0,240	0,513	16,0	<0,5	0
	Демкиной, 1950 г.	0,250	0,528	16,5	1	+3,1
	Демкиной, 1934 г.	0,254	0,534	15,7	1,5	-1,8
	Дональдсона	0,246	0,532	16,9	>1	+5,6
	Расчет	0,242	0,518	16,0	—	—
СС-3	ВНИИМ	0,207	0,210	7,7 ₆	0,5	+0,4
	Демкиной, 1950 г.	0,210	0,209	7,7	1,5	-0,3
	Демкиной, 1934 г.	0,211	0,225	7,7	2	-0,3
	Дональдсона	0,208	0,214	8,0 ₉	1	+4,8
	Расчет	0,205	0,210	7,72	—	—
ЖЗС-5	ВНИИМ	0,472	0,454	77,1	<0,5	+4,2
	Демкиной, 1950 г.	0,470	0,455	75,3	<0,5	+1,8
	Демкиной, 1934 г.	0,482	0,472	72,6	1,5	-1,9
	Дональдсона	0,469	0,465	76,4	1	+3,2
	Расчет	0,469	0,454	74,0	—	—
СЗС-2	ВНИИМ	0,234	0,406	24,2	<1	-5,1
	Демкиной, 1950 г.	0,239	0,403	26,1	0,5	+2,4
	Демкиной, 1934 г.	0,241	0,423	24,5	2	-3,9
	Дональдсона	0,244	0,417	26,7	1,5	+4,7
	Расчет	0,237	0,399	25,5	—	—

Марка	Прибор	Координаты цвета			Число порогов цветности по Мартинову	Отклонения по яркости, $\Delta\tau/\tau^0/0$
		x	y	$\bar{y} = \tau^0/0$		
ПС-3	ВНИИМ	0,386	0,223	5,7	1,5	-5,0
	Демкиной, 1950 г.	0,376	0,202	5,8	8	-3,3
	Демкиной, 1934 г.	0,383	0,229	6,0	1	0
	Дональдсона	0,378	0,231	6,3	1,5	+5,0
	Расчет	0,376	0,221	6,0	—	—
RG-6	ВНИИМ	0,587	0,330	23,1	2	+0,4
	Демкиной, 1950 г.	0,588	0,335	22,7	1,5	-1,3
	Демкиной, 1934 г.	0,589	0,347	23,2	>1,5	+0,9
	Дональдсона	0,586	0,345	24,2	1	+5,2
	Расчет	0,581	0,338	23,0	—	—
СС-1	ВНИИМ	0,340	0,375	34,5	<0,5	-0,9
	Демкиной, 1950 г.	0,339	0,366	35,6	0	+2,3
	Демкиной, 1934 г.	0,346	0,390	34,0	0	-2,3
	Дональдсона	0,344	0,387	36,4	1,5	+4,6
	Расчет	0,336	0,368	34,8	—	—
СС-2	ВНИИМ	0,287	0,296	17,2	0	-2,8
	Демкиной, 1950 г.	0,291	0,291	17,5	1	-1,1
	Демкиной, 1934 г.	0,295	0,314	17,4	1,5	-1,7
	Дональдсона	0,294	0,313	18,4	1,5	+4,0
	Расчет	0,289	0,297	17,7	—	—
Источ- ник „А“	ВНИИМ	0,456	0,407	—	1	—
	Демкиной, 1950 г.	0,450	0,406	—	0,5	—
	Демкиной, 1934 г.	0,450	0,412	—	0,5	—
	Дональдсона	0,456	0,412	—	1	—
	Расчет	0,448	0,407	—	—	—

В табл. 1 приведены результаты измерений, выраженные в международной системе XYZ в форме координат цветности и коэффициента отражения. В двух последних столбцах таблицы даны расхождения между показаниями колориметров и расчетными значениями в порогох цветности [10] и отклонения по яркости. Из этой таблицы следует, что показания нового колориметра и модернизированного колориметра Демкиной в общем несколько лучше согласуются между собой и с расчет-

ными значениями, чем результаты двух других колориметров. Причина, по-видимому, заключается в применении расчетной градуировки в первых двух случаях, причем в колориметре ГОИ модели 1950 г. расчетная градуировка была выполнена одновременно с введением поправки на координаты источника [11]. Однако некоторые результаты, полученные на колориметре ВНИИМ (например, для стекол ЖЗС-5, СЗС-2, ПС-3), несколько отступают от расчетных главным образом по величине коэффициента пропускания. Расхождение результатов можно объяснить различием спектральных составов полей сравнения, так как спектры пропускания измеряемых стекол ЖЗС-5, СЗС-2 и ПС-3 являются приблизительно дополнительными к спектрам пропускания основных цветов КЗС прибора.

Систематическое отклонение результатов измерения цвета сернобариевого экрана, освещенного источником «А», от теоретического значения характерно для наблюдателя, производившего измерение. Оно получается одним и тем же на всех приборах и объясняется индивидуальными особенностями кривых сложения данного наблюдателя.

Как следует из левой части табл. 2, опытные наблюдатели колориметристы при измерении на колориметре с использованием той же системы цветов КЗС давали другие значения для координат цвета источника «А».

Таблица 2

Инициалы наблюдателей	Измеряемый образец — сернобариевый экран, освещенный источником «А»					
	система КЗС			система РЖГ*		
	освещенность на сетчатке — 350 фотонов			освещенность на сетчатке — 800 фотонов		
	координаты цвета					
	x	y	$\bar{y}^0/0$	x'	y'	$\bar{y}'^0/0$
Е. Н. Ю.	0,456	0,407	100,4	0,443 ₃	0,406 ₁	103,2
Н. В. Л.	0,454	0,407	101,2	0,442 ₅	0,408 ₄	102,0
Н. И. С.	0,447	0,404	99,3	0,444 ₄	0,406 ₂	101,0
Л. Н. М.	0,447	0,403	102,0	0,443 ₂	0,405 ₄	102,2
А. М. Н.	0,453	0,402	100,8	0,445 ₇	0,406 ₇	104,5

*См. стр. 77.

б) Оценка случайных погрешностей измерения. Для оценки случайных погрешностей измерений на приборе при использовании системы цветов КЗС была определена область рассеяния результатов измерения одним наблюдателем цвета сернобариевого экрана, освещенного источником «А». Эта область рассеяния изображена на рис. 3 в виде совокупности точек, окруженных овалом, который отмечен цифрой 1 и ограничен пределами $\Delta x = 0,005$, $\Delta y = 0,003$; средняя арифметическая погрешность отдельного измерения составляет

$$\Delta x = \Delta y \approx 0,001; \frac{\Delta \bar{y}}{y} \approx 1\%.$$

Известно, что приблизительно с той же погрешностью измеряются координаты цвета на лабораторном колориметре Демкиной модели 1950 г.

Давая общую оценку результатам, можно сказать, что прибор, будучи использован как обычный колориметр, не обладает существенными преимуществами перед другими приборами.

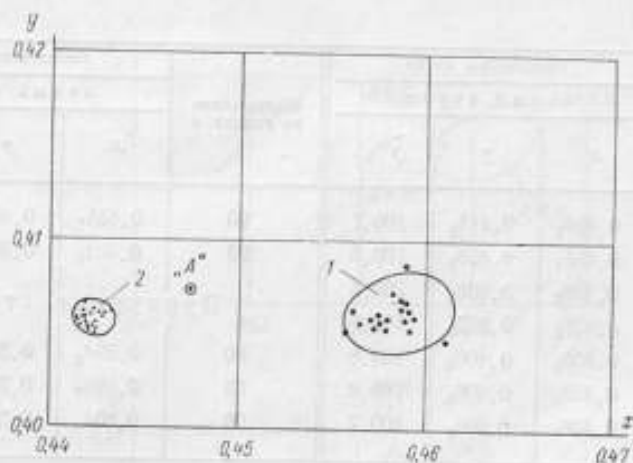


Рис. 3. Области рассеяния погрешностей измерения цвета сернобариевого экрана, освещенного источником «А».

1 — с системой основных цветов КЭС; 2 — с системой основных цветов РЖТ.

Дальнейшее исследование прибора было направлено на выяснение факторов, способствующих повышению точности измерения и освобождению результатов измерения от погрешностей, вызванных индивидуальными особенностями зрения наблюдателя.

в) Оценка влияния колебания напряжения в сети на результаты установки колориметрических равенств. Попутно отметим существенный для практики цветowych измерений факт устойчивости колориметрических равенств в широком диапазоне изменения напряжения на лампах при схеме их параллельного соединения.

В табл. 3 приведены результаты измерения координат цвета белого экрана и пурпурного стекла, выполненные при разных напряжениях на лампах в пределах 70 - 93 в. При этом цвет белого экрана при напряжении 85 в отвечает температуре 2850° К, т. е. источнику «А».

Как показывают цифры табл. 3, изменение напряжения на 15 в приводит к очень малым смещениям цветовых равенств $\Delta x = \Delta y \sim 0,003$. Во всяком случае, колебания напряжения в 1—2 в практически не отражаются на результатах.

Этот факт устойчивости цветовых равенств в приборе лишь подтверждает повседневный опыт неизменности соотношения цветов наземных предметов при сильном изменении спектрального состава дневного света в течение дня.

Отсюда следует также, что при измерении цвета отражающих и прозрачных предметов допустимы значительные колебания общего напря-

жения в сети, т. е. в этом случае прибор может использоваться без стабилизатора напряжения.

г) Различные трехцветные системы. Было проверено, в какой мере результаты колориметрических измерений зависят от выбора трех основных цветов и какая система цветов представляется наиболее удачной для измерения белых цветов.

Таблица 3

Напряжение на лампах, в	Координаты цвета			Напряжение на лампах, в	Координаты цвета		
	белый экран				белый экран		
	x	y	$\bar{y}^0/10$		x	y	$\bar{y}^0/10$
70	0,454 ₇	0,411 ₇	100,7	90	0,461 ₇	0,405 ₈	101,8
75	0,455 ₄	0,408 ₂	100,6	93	0,461 ₇	0,404 ₆	101,5
80	0,456 ₅	0,406 ₈	100,5	Пурпурное стекло			
82	0,457 ₆	0,407 ₀	100,7				
84	0,458 ₄	0,406 ₀	100,8	80	0,594 ₄	0,335 ₅	23,8
85	0,458 ₂	0,406 ₂	100,0	85	0,595 ₅	0,333 ₀	23,7
87	0,458 ₆	0,405 ₀	100,7	90	0,601 ₀	0,329 ₉	24,0

Примечание. Расчет координат цвета выполнялся по уравнениям градуировки, основанной на спектральном распределении энергии источника «А».

Измерение цвета сернобариевого экрана при источнике «А» допускает большое разнообразие в выборе основных цветов.

Было составлено восемь трехцветных систем. В каждой из этих систем измерялся цвет сернобариевого экрана. В табл. 4 представлены результаты этих измерений. Комбинации стекол отмечены соответствующими номерами.

Таблица 4

Номера комбинации стекол	Основные цвета	Координаты цвета		
		x	y	$\bar{y}^0/10$
1	Красный, зеленый, синий	0,456	0,407	100,5
2	Разбавленные розовый, желто-зеленый и голубой	0,447	0,409	102,2
3	Пурпурный, розовый, желто-зеленый	0,452	0,413	103,7
4	Красный, зеленый, синий (другой набор)	0,450	0,412	99,0
5	Пурпурный, голубой, желто-зеленый	0,452	0,409	102,3
6	Прозрачные красный, зеленый и синий	0,456	0,407	101,5
7	Желтый, голубой, пурпурный	0,448	0,413	102,8
8	Оранжевый, желто-зеленый, пурпурный	0,451	0,416	107,5
Теоретические значения		0,448	0,407	100,0

Примечание. Измерения выполнены с микрообъективом.

Мы видим, что расхождение результатов превышает пределы случайных погрешностей измерения. Односторонний характер отклонения можно объяснить отчасти индивидуальными свойствами зрения наблюдателя. Однако более вероятно, что значительный разброс между результатами вызван ошибками спектрофотометрических измерений пропускания стекол и ошибками, содержащимися в «кривых сложения».

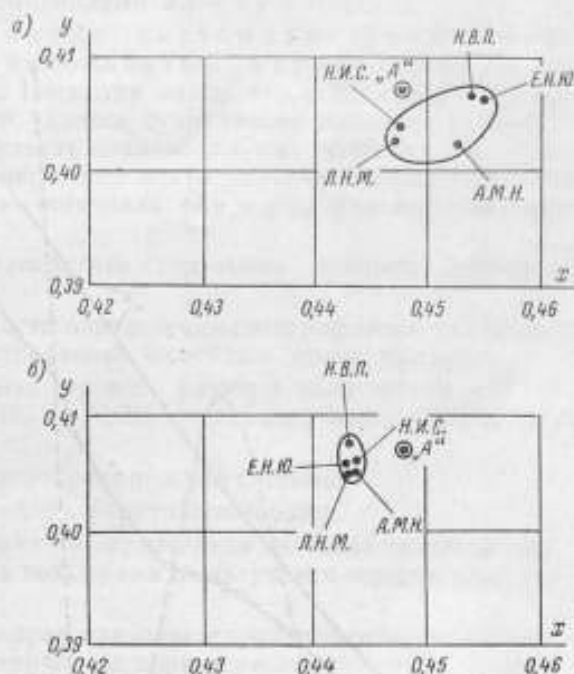


Рис. 4. Расхождения результатов пяти наблюдателей (Е. Н. Ю., Н. В. Л., Н. И. С., А. М. Н., Л. Н. М.) при измерении цвета сернобариевого экрана при источнике „А“ с использованием двух систем основных цветов.

а — КЗС; б — РЖГ.

д) Измерения в условиях близости спектрального состава. Для более подробного исследования была выбрана система двух прозрачных, мало насыщенных светофильтров: розового, желто-зеленого и голубого цветов (система РЖГ), т. е. та система, при которой наиболее сближаются спектральные составы измеряемого поля и поля сравнения.

С этой системой основных цветов были измерены координаты цвета сернобариевого экрана при источнике „А“ пятью наблюдателями. Результаты показали, что расхождение в определении координат цветности не превышало $\Delta x = \Delta y = 0,003$, в то время как с обычными основными цветами — КЗС — индивидуальные расхождения достигали значений $\Delta x = 0,008$; $\Delta y = 0,005$ (см. табл. 2 и рис. 4, а и б).

Представляло интерес сравнить спектральные составы полей зрения обоих применяемых систем основных цветов — обычной колориметрической и системы ненасыщенных цветов.

На рис. 5 представлена кривая спектрального распределения энергии источника «А» (испытуемое поле) и кривые распределения энергии в полях сравнения при двух указанных системах светофильтров.

Несомненно, что вышеуказанные положительные результаты с системой разбавленных цветов РЖГ были достигнуты благодаря существенному сближению спектральных составов полей сравнения колориметра при применении слабо насыщенных основных цветов.

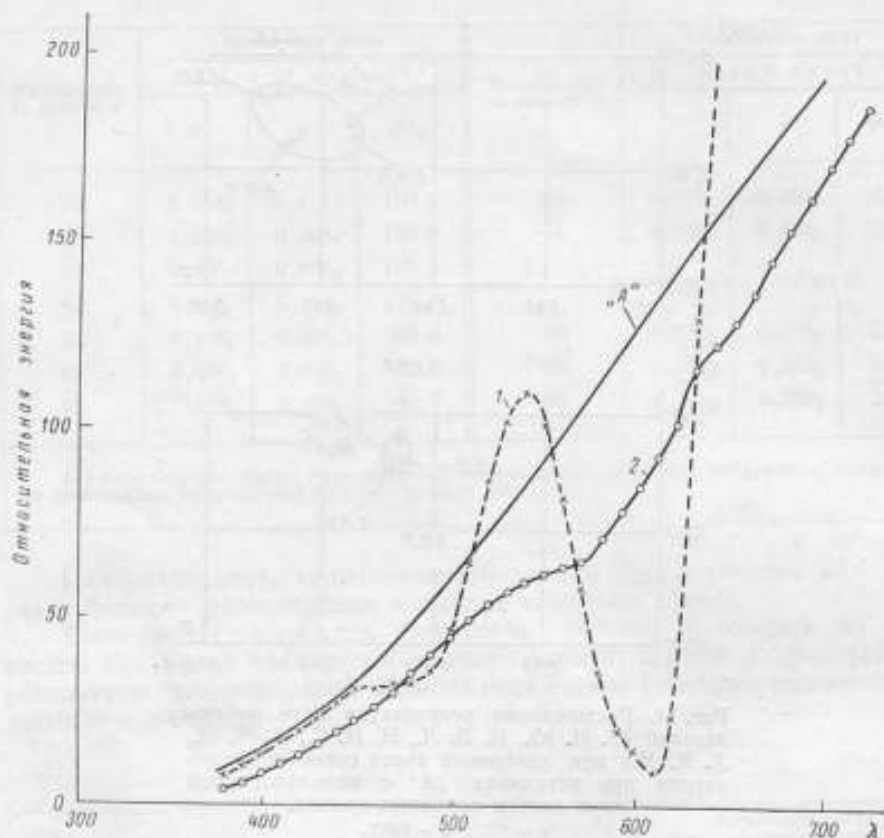


Рис. 5. Кривые относительного распределения энергии по спектру в поле сравнения прибора при измерении цвета сернобариевого экрана с источником «А» (сплошная линия) для двух систем светофильтров.

1 — КЗС; 2 — РЖГ.

е) Сравнительная оценка погрешности измерения. Следует заметить, что в случае близких спектральных составов полей сравнения колориметрические равенства устанавливаются более уверенно, чем в случае различия спектральных составов, как, например, при уравнивании цвета источника смесью красного, зеленого и синего.

При близких спектральных составах отсутствует хроматическая линия раздела полей, типичная для трехцветных колориметров. Кроме того, яркость полей зрения благодаря применению прозрачных стекол увеличивается более чем в $2\frac{1}{2}$ раза. Все эти благоприятные для работы глаза обстоятельства заметно способствуют повышению остроты цвето-различения. Для колориметрической оценки последней определялась средняя арифметическая погрешность для двадцати независимых коло-

симметрических равенств. Результаты измерения представлены в виде разброса точек на графике xu рис. 3 (отмечено цифрой 2).

Средняя арифметическая погрешность оказалась порядка $\Delta x = \Delta y = 0,0004$, т.е. приблизительно в два раза меньше погрешности измерения $\Delta x = \Delta y = 0,001$ того же самого наблюдателя на том же приборе при использовании насыщенных красного, зеленого и синего цветов и почти в десять раз меньше погрешности измерений на колориметре с малыми полями $\Delta x = \Delta y = 0,005$.

ж) Устранение систематических погрешностей, вызванных неточностью характеристик XYZ основных цветов. Несмотря на то, что специальным выбором системы основных цветов удалось существенно повысить точность и уменьшить влияние на результат индивидуальных особенностей зрения наблюдателя, все-таки еще имеет место различие между теоретическими значениями координат источника «А» и результатами измерения их на приборе.

Можно предполагать следующие причины несовпадения результатов:

- 1) погрешность определения спектрофотометрических характеристик стекол, осуществляющих основные цвета прибора;
- 2) отклонение углового размера поля зрения (10°) в колориметре от принятого в 1931 г. МОК при стандартизации кривых сложения цветов поля в 2° ;
- 3) селективность оптической системы;
- 4) селективность баритового экрана;
- 5) погрешности в определении цветовой температуры ламп и отклонение излучения вольфрама от излучения черного тела при температуре 2850°K .

Первая и вторая причины представляются наиболее вероятными.* Спектрофотометрические характеристики стекол были проверены на спектрофотометре СФ-2. Новые данные были положены в основу расчета градуировки.

Действительно, оказалось, что относительные расхождения в коэффициентах пропускания в некоторых участках спектра при малых значениях доходили до 5 и даже до 10%, хотя как тот, так и другой прибор были точно выверены.

Координаты цвета сернобариевого экрана при источнике «А», вычисленные по новой градуировке для каждого из пяти наблюдателей, представлены в табл. 5 и на рис. 6, на котором кружки — результаты пяти наблюдателей, обработанные по спектрофотометрическим данным, полученным на двойном монохроматоре с приемным устройством; крестики — те же результаты, обработанные по спектрофотометрическим данным, полученным на приборе СФ-2; точки — теоретическое значение, т.е. цветность идеального белого экрана при источнике «А».

Как следует из табл. 5 и рис. 6, координаты цвета сернобариевого экрана приблизились к теоретическим значениям, хотя полного совпадения не было достигнуто. Однако это сближение измеренных и теоретических значений еще не может являться окончательным аргументом в пользу правильности показаний спектрофотометра СФ-2. Необходимо

* Вторая причина не исследовалась из-за отсутствия в то время данных о «кривых сложения» с полем зрения в 10° .

также исследовать другую, не менее вескую причину возможных различий между расчетными и измеренными значениями, обусловленную отступлением угловых размеров поля зрения в приборе от стандарта МЭК 1931 г.

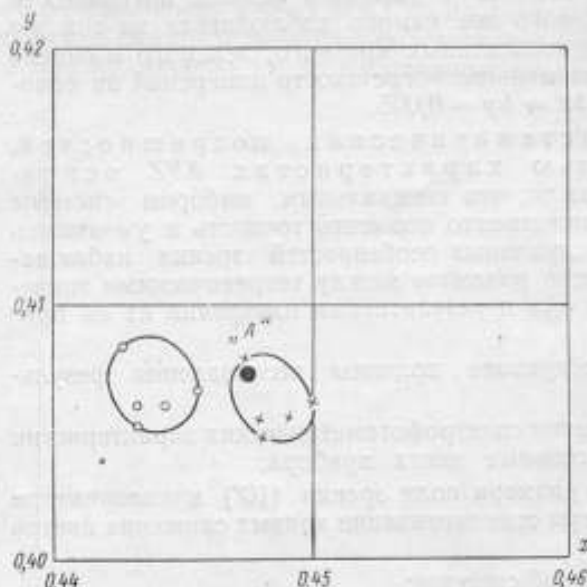


Рис. 6. Влияние погрешностей спектрофотометрических измерений светофильтров системы РЖГ на результаты измерения цвета сернобариевого экрана при источнике „Л*“.

з) Введение поправки на «белую точку». Оставшееся различие все еще превышает случайную погрешность измерения. При существующих обстоятельствах решено было его устра-

Таблица 5

Инициалы наблюдателей	Координаты цвета		
	x	y	$\bar{y}^0/10$
Е. Н. Ю.	0,448 ₀	0,405 ₃	103,7
Н. В. Л.	0,447 ₄	0,407 ₉	102,6
Н. И. С.	0,449 ₁	0,405 ₂	101,5
Л. Н. М.	0,448 ₀	0,404 ₉	102,8
А. М. Н.	0,450 ₁	0,406 ₃	105,2

Примечание. В основу градуировки положены данные спектрофотометра СФ-2.

нить введением так называемой поправки на «белую точку» [12]. При обработке результатов измерения на колориметре ВНИИМ эта поправка принимает простую и естественную форму и сводится к изменению масштаба по осям.

Пусть в результате измерений получены значения координат цвета сернобариевого экрана, при источнике „Л*“ равные $\bar{x}_\Lambda, \bar{y}_\Lambda, \bar{z}_\Lambda$, в то время как его теоретические координаты равны $\bar{x}_\Lambda^0, \bar{y}_\Lambda^0, \bar{z}_\Lambda^0$. Тогда

$$\chi_x = \frac{\bar{x}_\Lambda^0}{\bar{x}_\Lambda}; \quad \chi_y = \frac{\bar{y}_\Lambda^0}{\bar{y}_\Lambda}; \quad \chi_z = \frac{\bar{z}_\Lambda^0}{\bar{z}_\Lambda}$$

являются теми коэффициентами, на которые надо умножить координаты цвета измеренных на приборе образцов, для того чтобы исключить систематические погрешности. Обычно эти коэффициенты как множители вводились в уравнения градуировки прибора. Чтобы убедиться в эффективности вводимой поправки, обратимся к табл. 6, в которой приведены координаты цвета нескольких керамических образцов, слегка отличающихся по цвету от белого сернобариевого экрана. Координаты их цветов были вычислены по данным колориметрических измерений без поправки и с поправкой. Эти результаты сравниваются с расчетными значениями, полученными по данным спектрофотометра СФ-2. Из этой таблицы ясно, что поправка улучшает результат. Расхождения между измеренными и вычисленными значениями не превышают значений $\Delta x = \Delta y = 0,001$, и в большинстве случаев того же порядка, что и воспроизводимость результатов на приборе в разные дни.

Таблица 6

Номера образцов	Координаты цвета			Примечание
	x	y	ρ^{θ}/ρ	
Барий сернистый	0,4475	0,4048	102,2	Без поправки Расчетные
	0,4476	0,4074	100,0	
№ 4	0,4511	0,4086	80,0	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4514	0,4108	77,8	
	0,4515	0,4110	77,9	
№ 21	0,4515	0,4083	79,8	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4519	0,4106	77,6	
	0,4511	0,4110	77,3	
№ 6	0,4433	0,4070	75,2	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4437	0,4094	73,1	
	0,4437	0,4096	72,7	
№ 14	0,4435	0,4063	73,6	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4439	0,4087	71,6	
	0,4441	0,4095	73,0	
№ 12	0,4533	0,4087	73,7	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4539	0,4110	72,1	
	0,4529	0,4115	73,0	
№ 15	0,4517	0,4081	76,4	Без поправки С поправкой Расчетные
	0,4520	0,4104	74,3	
	0,4512	0,4111	75,2	

Табл. 7 иллюстрирует повторяемость результатов на приборе в разные дни на протяжении года. В ней приведены результаты измерения в системе РЖГ координат цвета сернобариевого экрана при источнике «А» без поправок, вычисленные по градуировке, в основу которой положены данные о светофильтрах по измерениям на двойном монохроматоре.

Следует отметить, что показания прибора сохранили свою устойчивость и после значительного перерыва в измерениях, вызванного перестановкой прибора в другое помещение, его сборкой и юстировкой заново в промежутке между 30/IX и 21/XII 1955 г.

и) Чувствительность прибора к малым изменениям цвета. Исследование микрообъектива явилось первой иллюстрацией высокой чувствительности прибора и пригодности его для регистрации малых цветовых различий.

В табл. 8 показано изменение координат цвета белого сернобариевого экрана, освещенного источником «А», после введения дополнительной оптики в пучок измеряемого цвета: объектива, микрообъектива, склеенного из двух линз, и совместно объектива с микрообъективом. Измерения производились с системой основных цветов КЗС при освещенности приблизительно 300 лк.

Эта таблица иллюстрирует селективность оптического стекла, которую прибор регистрирует как систематическое смещение координат цветности в направлении к спектральному желтому по мере увеличения числа оптических деталей в пучке света, отраженного от белого образца.

Высокая чувствительность прибора, достигнутая специальным подбором цветных стекол, позволила впоследствии применить его для измерения малых цветовых различий при оценке белизны промышленных изделий [13].

Таблица 7

Даты измерений	Координаты цвета		
	x	y	$\bar{y}^0/0$
19/X 1954 г.	0,4449	0,4052	102,2
27/X	0,4433	0,4061	101,2
25/II 1955 г.	0,4439	0,4064	102,1
1/III	0,4439	0,4063	101,3
16/III	0,4421	0,4062	101,5
2/IV	0,4427	0,4055	101,6
26/IV	0,4428	0,4054	102,1
18/V	0,4428	0,4058	102,4
30/VI	0,4424	0,4056	102,2
2/VII	0,4428	0,4052	101,6
3/IX	0,4435	0,4051	102,2
21/IX	0,4426	0,4055	102,3
30/IX	0,4433	0,4049	101,5
21/XII	0,4431	0,4059	101,5
22/XII	0,4440	0,4054	101,4
Среднее	$0,4432 \pm 0,0006$	$0,4056 \pm 0,0004$	$101,8$ $\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}} = 0,40\%$
Примечание. Расчет выполнен без поправки на „белую точку“.			

к) Измерение насыщенных цветов в условиях полей сравнения близких спектральных составов. Удачный прием измерения белых цветов в системе основных, образующих поле сравнения близкого спектрального состава с измеряемым образцом, был распространен на другие области цветового пространства.

Таблица 8

Условия измерения	Координаты цвета		
	x	y	$\bar{y} = \tau^0/0$
Без оптики	0,454 ₂	0,404 ₅	101,3
С объективом . . .	0,454 ₀	0,405 ₃	98,7
С микрообъективом	0,456 ₇	0,409 ₄	83,5
С объективом и микрообъективом	0,457 ₄	0,409 ₂	77,4

Проверка производилась на пяти отражающих образцах, каковыми служили цветные смальты — красного, оранжевого, желтого, зеленого

и синего цветов, при этом одна поверхность образца была полированной, другая матовой.

Каждый цвет измеряли специально подобранным треугольником основных цветов подобно тому, как это делалось для белых цветов. В каждой области цветов были оценены погрешности и пороги при установке колориметрических равенств. Эта оценка была выполнена на более насыщенных блестящих образцах.

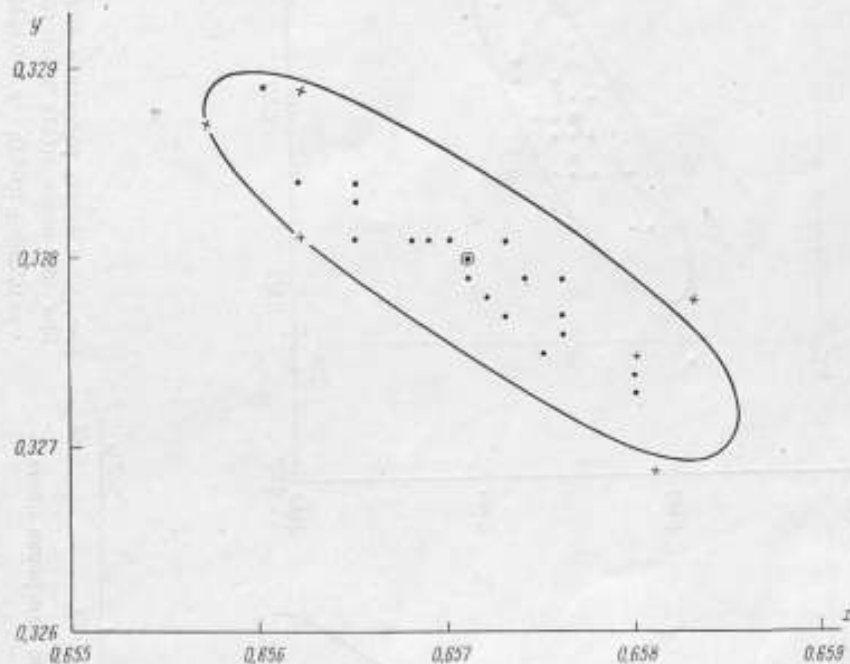


Рис. 7. Область рассеяния погрешностей при измерении цвета красного образца:

$$x = 0,6571 \pm 0,0004; \quad y = 0,3280 \pm 0,0003; \quad \rho = 15,2\%; \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,9\%.$$

На рис. 7—11 изображены соответственно пять участков цветового графика x, y . Точками представлены области естественного рассеяния погрешностей, точкой в кружке — средний результат измерений, крестиками — пороговые значения, определяющие пороговые эллипсы.

Общая оценка результатов такова, что погрешности измерений насыщенных цветов на колориметре в среднем составляют величину $\Delta x = \Delta y = 0,0005$, $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,5\%$, т. е. того же порядка, что и при измерении белых цветов. Исключение составляет область синих цветов, для которых погрешность в 2—5 раз больше.

В табл. 9 приведены значения координат цвета матовых поверхностей образцов, измеренные на колориметре ВНИИМ и вычисленные по спектрофотометрическим данным. Как следует из этой таблицы, расхождения между измеренными и расчетными данными существенно превышают погрешности установок колориметрических равенств, составляя величину порядка $\Delta x = \Delta y = 0,003$, $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 3\%$. По-видимому, эти различия следует объяснить различием условий освещения образцов в колориметре и приборе СФ-2М.

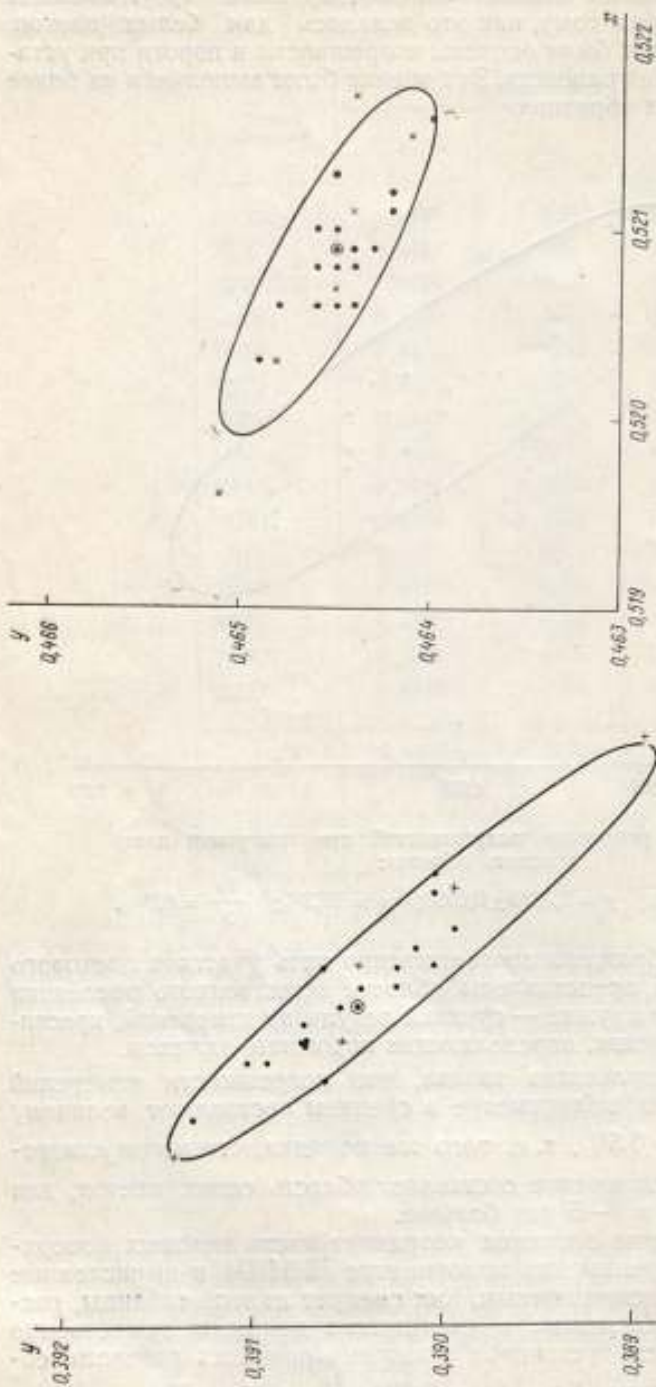


Рис. 8. Область рассеяния погрешностей при измерении цвета оранжевого образца: $x = 0,6037 \pm 0,0003$; $y = 0,3901 \pm 0,0004$; $\rho = 44,6^{\circ}/\sigma$; $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,40/\sigma$.

Рис. 9. Область рассеяния погрешностей при измерении цвета желтого образца: $x = 0,5209 \pm 0,0002$; $y = 0,4645 \pm 0,0001$; $\rho = 71,5$; $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,40/\sigma$.

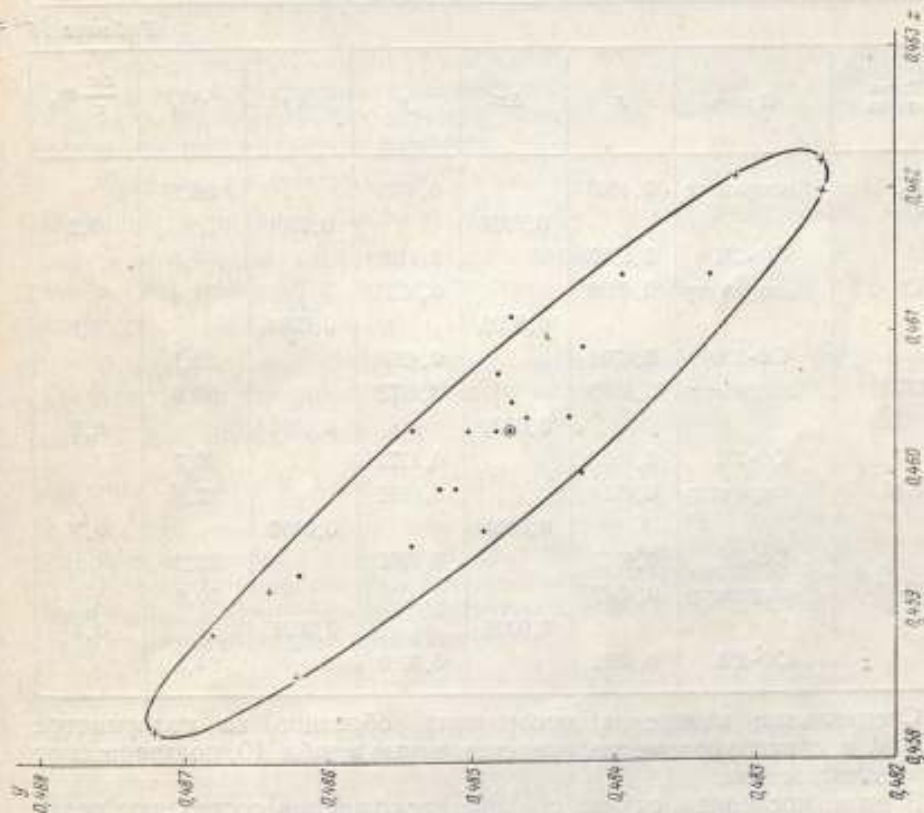


Рис. 10. Область рассеяния погрешностей при измерении цвета зеленого образца:

$$x = 0,4603 \pm 0,0005; \quad y = 0,4847 \pm 0,0005; \quad p = 24,8; \quad \frac{\Delta p}{p} = 0,40\%$$

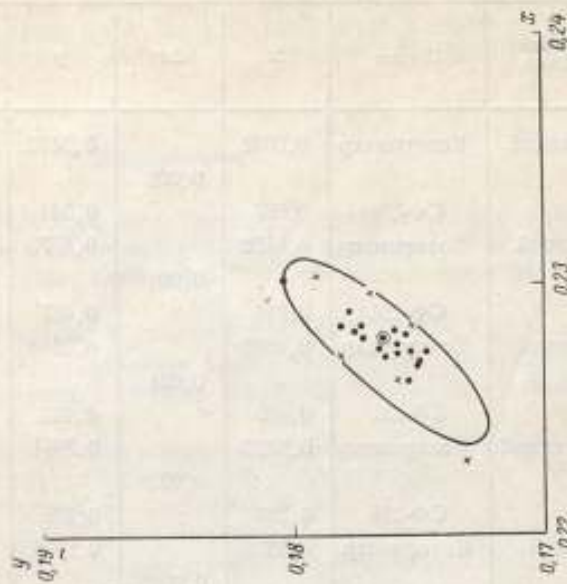


Рис. 11. Область рассеяния погрешностей при измерении цвета синего образца:

$$x = 0,2278 \pm 0,0007; \quad y = 0,1762 \pm 0,0011;$$

$$p = 2,85\%; \quad \frac{\Delta p}{p} = 0,40\%$$

Таблица 9

Название образца	Прибор	x	Δx	y	Δy	$\rho^0/\%$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} \%$
Красный	Колориметр	0,6042	0,003	0,3449	0,001	18,9	1,6
	СФ-2М	0,607		0,344		18,6	
Желтый	Колориметр	0,5158	0,001	0,4576	0,0005	70,5	0,6
	СФ-2М	0,515		0,457		70,1	
Зеленый	Колориметр	0,4560	0,001	0,4640	0,001	27,8	2,1
	СФ-2М	0,457		0,463		28,4	
Оранжевый	Колориметр	0,5820	0,003	0,3911	0,003	48,8	2
	СФ-2М	0,585		0,388		48,1	
Синий	Колориметр	0,3375	0,0005	0,2915	0,007	8,5	9
	СФ-2М	0,338		0,298		7,8	

Таблица 10

Марка стекла	Прибор	x	Δx	y	Δy	$\tau^0/\%$	$\frac{\Delta \tau}{\tau} \%$
СЗС-14	Колориметр	0,4405	0,0008	0,4107	0,0001	84,6	0,2
	СФ-2М	0,4397		0,4106		84,8	
ОС-6	Колориметр	0,4698	0,0003	0,4205	0,0004	84,4	0,8
	СФ-2М	0,4701		0,4209		85,1	
ЖС-11	Колориметр	0,4553	0,0002	0,4173	0,0001	90,0	0,8
	СФ-2М	0,4555		0,4172		90,7	
ПС-5	Колориметр	0,4514	0,0001	0,4042	0,0010	82,8	0,7
	СФ-2М	0,4515		0,4052		82,2	
СС-13	Колориметр	0,4347	0,0005	0,4039	0,0001	80,8	0,4
	СФ-2М	0,4352		0,4040		80,5	

Специальные измерения прозрачных образцов на колориметре ВНИИМ и спектрофотометре, представленные в табл. 10, подтверждают это предположение.

В этом последнем случае средние расхождения составляют величину порядка $\Delta x = \Delta y = 0,0003$, $\frac{\Delta \tau}{\tau} = 0,5\%$, несмотря на то что слабо

окрашенные образцы, каковыми являются применявшиеся стекла, представляют в колориметрии наиболее трудный случай для получения согласованных результатов при визуальных измерениях и расчете по спектрофотометрическим данным и „кривым сложения“ среднего наблюдателя.

Заклучение

Колориметр ВНИИМ был изготовлен с учетом последних достижений в области построения колориметрических приборов. Он обладает следующими особенностями, повышающими точность цветовых измерений:

- 1) большим полем зрения с угловым размером 10° ;
- 2) возможностью использования расчетной градуировки благодаря отсутствию резко селективных сред и поверхностей в его оптической системе;
- 3) возможностью измерения цветов в условиях близости спектрального состава, что достигается при помощи соответствующего подбора светофильтров, осуществляющих основные цвета;
- 4) возможностью измерения насыщенных цветов без разбавления путем переноса одного из основных цветов в пучок измеряемого цвета;
- 5) измерением координат цвета по закону обратных квадратов расстояний, т. е. непосредственно на основе измерения длин;
- 6) наличием микрообъектива для измерения малых образцов диаметром 3 мм.

Исследование колориметра показало, что сближение спектрального состава полей сравнения позволяет избежать влияния индивидуальных особенностей глаза наблюдателя и существенно повысить точность установки колориметрических равенств.

Средняя арифметическая погрешность в этом случае составляет величину порядка $\Delta x = \Delta y = 0,0005$, $\frac{\Delta B}{B} = 0,5\%$. Результаты измерений, повторенные через некоторые промежутки времени, воспроизводятся на приборе с погрешностью того же порядка: $\Delta x = \Delta y = -0,0005 - 0,001$, $\frac{\Delta B}{B} = 0,5 - 1\%$.

Результаты измерения на колориметре согласуются с результатами расчета цвета по спектрофотометрическим данным в следующих пределах: для отражающих образцов $\Delta x = \Delta y = 0,003$, $\frac{\Delta p}{p} = 3\%$, для прозрачных образцов $\Delta x = \Delta y = 0,001$, $\frac{\Delta \tau}{\tau} = 1,5\%$.

Колориметр пригоден для выполнения научно-исследовательских работ и поверочных измерений, требующих высокой точности.

Колориметрические измерения высокой точности предъявляют новые требования к точности спектрофотометрических измерений и стандартизации средних «кривых сложения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Wright W. D., «Trans. Opt. Soc.», v. 29, 1927—1928, p. 225.
2. Brout W. R. and Mac Adam D. L., «JOSA», v. 39, 1949, p. 808.
3. Тиходеев П. М., Основной способ разноцветных световых измерений, Труды ВНИИМ, вып. 17(77), 1952, стр. 17.
4. Карташевская В. Е., Определение спектральной чувствительности глаза, Труды ВНИИМ, вып. 17(77), 1952, стр. 3.

5. Юстова Е. Н., О точности обычных градуировок трехцветного колориметра по трем цветам и четырем цветностям, Труды ВНИИМ, вып. 17(77), 1952, стр. 84.
6. Richter M., «Zs. f. techn. Phys.», Bd. 19, 1938, S. 102.
7. Donaldson R., «Proc. Phys. Soc.», v. 59, 1947, p. 554.
8. Лобанова Н. В. и Раутиан Г. Н., Большие поля в колориметрии, ДАН, т. 68, 1949, стр. 1025.
9. «JOSA», v. 45, 1955, p. 894.
10. Болдырев Н. Г. и Мартынов К. Б., Равноконтрастный цветовой график, «Проблемы физиологической оптики», т. 8, 1953, стр. 124.
11. Лобанова Н. В., Новый способ градуировки колориметра, «Светотехника», № 4, 1955, стр. 7.
12. Гуревич М. М., Цвет и его измерение, Издательство АН СССР, 1950, стр. 150.
13. Юстова Е. Н., О белизне и способах ее измерения, «Светотехника», № 2, 1957, стр. 16.

Поступила в редакцию
10/XII 1959 г.

Е. Н. ЮСТОВА

ВНИИМ

НОВЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЦВЕТНОГО ЗРЕНИЯ

Теоретически разработаны и осуществлены новые таблицы для испытания цветного зрения в условиях дневного и вечернего освещения. Таблицы выполнены в виде дырчатых трафаретов, налагаемых на фон и фигуру в виде кольца Ландольта, окрашенные в цвета, не различаемые цветнослепыми. Эти цвета были подобраны и рассчитаны на основе данных о физиологической системе приемников глаза.

Многочисленные статистические обследования цветного зрения [1—8] показывают, что 10—15% населения обладает недостатками цветного зрения в той или иной форме. Из них около 3% приходится на долю так называемых цветнослепых, или дихроматов, т. е. лиц, цветовые восприятия которых выражаются двухмерным многообразием, в отличие от трехмерного многообразия цветовых восприятий нормального наблюдателя. Остальные 7—12% характеризуются или ослабленностью восприятия в некоторой области цветов, или таким искажением восприятия, которое может быть выражено наложением «светофильтра» [9].

Нормальность цветоразличения является весьма важным условием для ряда профессий, и в настоящее время при отборе работников транспорта и некоторых военных специальностей производится, как известно, проверка цветного зрения. Надо отметить, что этот отбор осуществляется фактически с большой перестраховкой и ряд лиц отстраняется от работы без достаточных к тому оснований. Дело в том, что не существует четко разработанных и метрологически обоснованных испытаний, определяющих пригодность или непригодность людей для выполнения конкретных задач, связанных с цветоразличением.

Необходимость такого рода конкретных дифференцированных испытаний ощущается и в ряде других профессий, которые связаны с оценкой цвета, например в лакокрасочной, текстильной и полиграфической промышленности, а также в области цветного кино и цветного телевидения. Между тем в этих областях проверок цветного зрения, например, работников, контролирующую продукцию, зачастую вообще не практикуется.

В настоящее время применяются два способа испытания цветного зрения: на специальном приборе — аномалоскопе и на цветных таблицах. До последнего времени в Советском Союзе имеются 4—5 аномалоскопов конструкции Нагеля и лишь теперь серийно выпускается отечественный аномалоскоп со стеклянными светофильтрами новой оригинальной кон-

струкции ГОИ [10]. Этот прибор благодаря большой простоте обращения и лучшей четкости диагноза по сравнению с прибором Нагеля, вероятно, получит более широкое распространение. Но, как всякий оптический прибор с электрическим включением, он не всегда может быть применен в любых (например, полевых) условиях. Переноска его также связана с некоторыми трудностями. Кроме того, сам процесс испытания требует хотя бы элементарных навыков у наблюдателя (умение смотреть одним глазом и фокусировать окуляр), что занимает при испытаниях некоторое дополнительное время.

В практике массового профессионального отбора применяются различные варианты цветных испытательных таблиц. Таблицы имеют ряд практических преимуществ перед аномалоскопом: портативность, простота обращения, большая скорость испытания, наглядность результата испытания, простота их изготовления. Этими положительными качествами объясняется их широкая распространенность в различных вариантах.

Из иностранных таблиц известны таблицы Штиллинга, Ишихара [11], Шаафа, Харди и т. п. В СССР применяются «полихроматические» таблицы Е. Б. Рабкина [12], вышедшие в 1955 г. шестым изданием; по существу они довольно близки к иностранным таблицам. Как выяснилось при их колориметрической проверке [13], они обладают некоторыми существенными неточностями в подборе цветов, хотя по отзывам советских [14] и зарубежных [15] авторов все же признаются наиболее совершенными.

Идея испытания цветного зрения с помощью таких таблиц заключается в следующем. На цветном пятнистом фоне составляется пятнистая фигура или цифра такого цвета, который дихромат не отличает от цвета фона. Испытуемый должен назвать эту фигуру или цифру. Цветнослепые не могут этого сделать.

Совершенно очевидно, что наиболее существенным при создании таблиц является правильный подбор цветов. До сих пор эта задача решалась чисто эмпирически. Все существующие в настоящее время испытательные таблицы (полихроматические, псевдоизохроматические и т. п.) для диагностики цветного зрения осуществлялись, по-видимому, путем проб и подгонок нужных цветов при непосредственном участии цветнослепых. Как в предисловиях к этим таблицам, так и в существующей литературе по данному вопросу [11, 12, 16, 17] нет никаких методических указаний относительно условий подбора цветов для таблиц. Единственным способом проверки правильности таблиц и их неизменности являлось лишь статистическое обследование.

Вследствие неправильности в подборе цветов и в способе оформления в существующих таблицах имеется ряд недостатков. Сюда относятся: 1) включение в таблицы большого числа нерациональных испытаний, не вскрывающих типа дефекта, а лишь удлиняющих время испытания; 2) возможность заучивания таблиц; 3) наличие излишней пестроты («камуфляжа»), рассеивающей внимание наблюдателя, отчего с помощью таблиц испытывается не только острота цветоразличения, но и способность наблюдателя воссоздавать (объединять) образ из разрозненных элементов.

Задача настоящей работы заключалась в создании более совершенных таблиц. Она возникла в результате выполненного автором исследования по определению колориметрических свойств основных цветовоспринимающих приемников глаза из опытов с цветнослепыми [18—22]. Решение ее должно явиться непосредственным практическим применением результатов этого исследования.

В настоящей работе подбор цветов для таблиц и контроль за их неизменностью впервые осуществляется методически, на уровне современного состояния метрологии в области цветовых измерений. Поэтому в данном отношении новые таблицы свободны от какого-либо подражания и копирования.

Основные требования, которые предъявляются к таблицам — это четкость диагноза, простота изготовления, возможность воспроизведения, доступность колориметрического контроля за их изменением в результате износа и, наконец, исключение возможности заучивания.

Первые опыты по составлению таблиц были предприняты автором в 1951 г. и дали положительные результаты. В итоге настоящей работы создан пробный экземпляр таблиц.

Необходимо подчеркнуть, что при создании таблиц ставилась цель отсева лишь цветнослепых и цветослабых согласно классификации [23]. Обнаружение аномальных трихроматических форм зрения не предполагалось и не могло быть достигнуто по следующим причинам. Испытание для опознания аномальных трихроматов предполагает одинаковые цветовые характеристики при резком различии спектральных составов. Для получения таких тестов красящие пигменты непригодны, так как они обладают пологими спектральными характеристиками отражения и среди них не встречается желтых или оранжевых с резким максимумом в желто-оранжевой части спектра, где свойства зрения трехцветных аномалов особенно характерно отличаются. Обнаружение аномальных трихроматов возможно лишь на спектральных приборах или в специальных условиях, как это имеет место в аномалоскопе Г. Н. Раутмана. Поэтому для подбора неразличимых аномалами пар необходимо применять не только колориметрическую, но и спектрофотометрическую методику.

Колориметрическая методика подбора цветов для таблиц

Как уже упоминалось, колориметрия дает рациональную научную основу для построения таблиц. Колориметрические данные о цветовом зрении указывают те направления в цветовом пространстве, вдоль которых располагаются цвета, неразличимые дихроматами. Определяя цветовые координаты различных красок путем измерения их на трехцветном колориметре и используя полученные данные об основной физиологической системе [18—22], можно находить такие сочетания красок, которые будут неразличимыми для различных групп цветнослепых.

При подборе цветов для таблиц следует исходить из того условия, чтобы в данной паре цветов были одинаковыми две цветовые координаты в основной физиологической координатной системе *RGB*. Пара третьих координат должна быть различна. Этим обеспечивается различение данных двух цветов нормальными наблюдателями, в то время как дихромат этого различия не воспринимает из-за потери чувствительности соответствующего приемника. Данное условие можно выразить следующим образом.

В таблицах для краснослепых должно быть:

$$\bar{r}_1 \neq \bar{r}_2, \quad \bar{g}_1 = \bar{g}_2, \quad \bar{b}_1 = \bar{b}_2;$$

в таблицах для зеленослепых:

$$\bar{r}_1 = \bar{r}_2, \quad \bar{g}_1 \neq \bar{g}_2, \quad \bar{b}_1 = \bar{b}_2;$$

в таблицах для синеслепых

$$\bar{r}_1 = \bar{r}_2, \quad \bar{g}_1 = \bar{g}_2, \quad \bar{b}_1 \neq \bar{b}_2.$$

где $\bar{r}_1, \bar{g}_1, \bar{b}_1$ и $\bar{r}_2, \bar{g}_2, \bar{b}_2$ соответственно координаты двух цветов в системе RGB . В геометрическом представлении в цветовом пространстве это будут цвета, лежащие на прямых, параллельных осям основной физиологической системы RGB . В принципе для диагноза трех форм цветовой слепоты достаточно осуществить три пары цветов, не различаемых соответственно краснослепыми (протанопами), зеленослепыми (дейтеранопами) и синеслепыми (тританопами).

На основании этих соображений была разработана методика подбора цветов. Из красителей и пигментов изготовлялись ступенчатые шкалы с различной степенью разбелки (можно также использовать и смеси красок), цвета которых измерялись на трехцветном колориметре. Измерение цвета шкал производилось при таком освещении, которое отвечает условиям применения таблиц. Таблицы составлялись в двух вариантах — для условий естественного дневного освещения, которому соответствует цветовая температура $6500^\circ K$ (источник «С»), и для условий искусственного освещения с цветовой температурой $2850^\circ K$ (источник «А»).

Полученные таким образом цветовые координаты $\bar{k}, \bar{z}, \bar{c}$ красок в системе цветов колориметра представлялись графически в виде проекций на координатные плоскости \bar{kz} и \bar{kc} . Совокупность точек, представляющих различные степени разбелки одной и той же краски, соединялись на графике линией. На эти же графики наносились проекции осей физиологической системы. С помощью таких графиков можно заключить, какие из цветов являются неразличимыми для лиц с тем или иным видом цветовой слепоты (например, рис. 1, подробности см. на стр. 95).

При составлении таблиц для обнаружения слепоты к синим цветам было использовано то упрощающее обстоятельство, что кривая видности синеслепого (тританопа) по причине малого яркостного коэффициента у координаты \bar{b} [22] практически совпадает с кривой видности лиц с нормальным цветным зрением. В силу этого подбор цветов, не различаемых синеслепыми, производился с помощью графика цветностей.

Изменение цветностей вышеупомянутых ступенчатых шкал представлялось графически в виде линий в треугольнике kzc прибора. Цветности, не различаемые синеслепыми, в этом графике располагаются на прямых, сходящихся в точке B , представляющей след пересечения физиологической оси B с плоскостью треугольника. Отсюда легко определялось, какие ступени шкал являются неразличимыми для синеслепого по цветности. Для полного цветового равенства необходимы еще равенства коэффициентов отражения у этих ступеней шкал. Такое уравнивание достигалось путем добавления черной краски (например, рис. 2, подробности см. на стр. 98).

Колориметрическое исследование красок и выбор пар цветов, не различаемых дихроматами

В соответствии с вышеупомянутой методикой на трехцветном колориметре системы Демкиной исследовались различные краски: набор масляных красок Ленинградского завода художественных красок, некоторые из типографских красок, применяемые в 1-й Художественной литографии, а также несколько анилиновых красителей.

Ступенчатые шкалы из масляных красок с различной степенью разбелки накрашивали от руки мягкой кистью на бумажной подложке. Различные степени разбелки были подобраны приблизительно более или

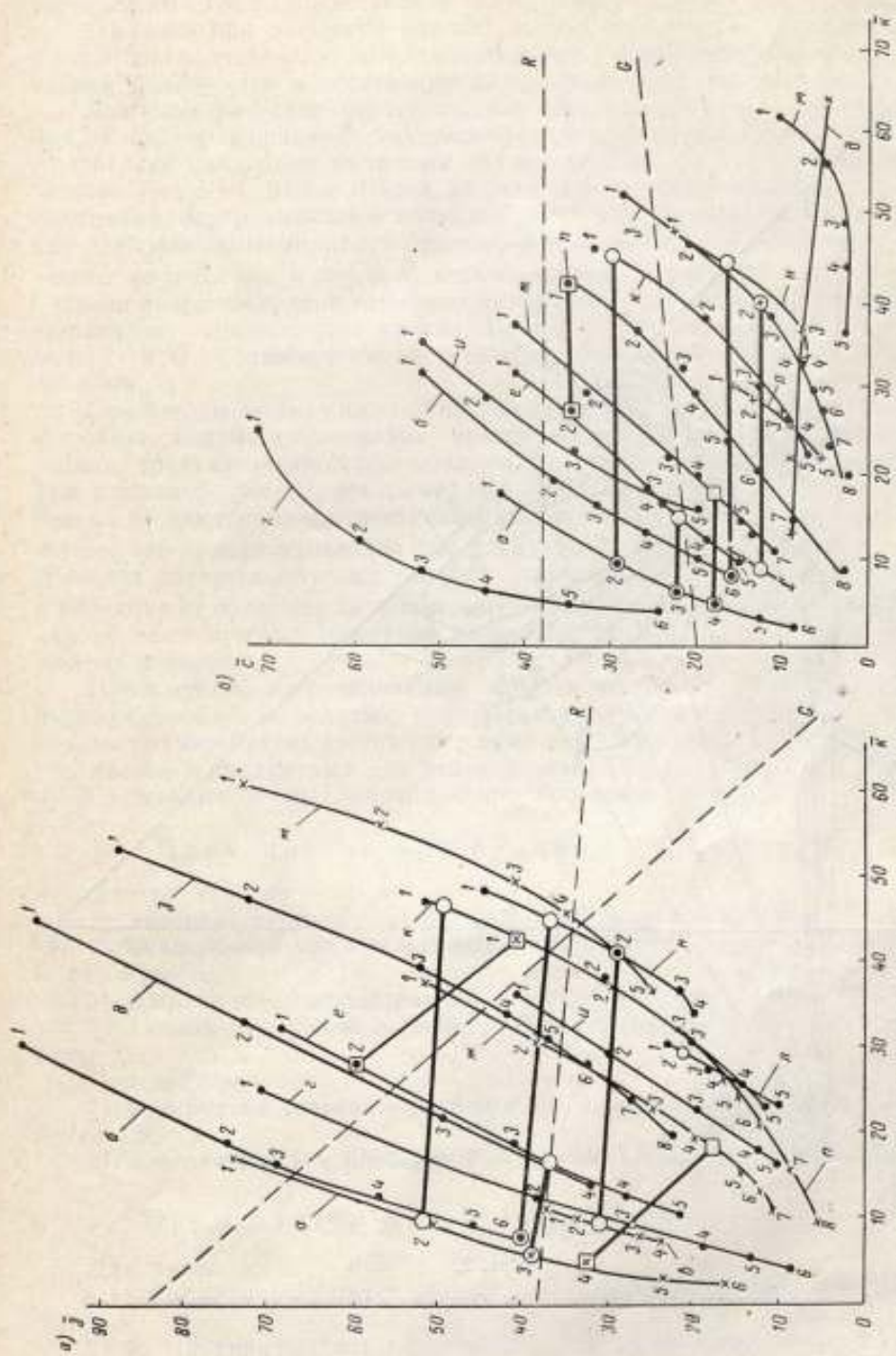


Рис. 1. а — изумрудная зеленая; б — кобальт азисный; в — окис хрома; г — ультрамарин; д — стронциановая желтая; е — жемчужная кость; ж — охра золотистая; з — краплак фиолетовый; и — кобальт фиолетовый; к — кадмий фиолетовый; л — кадмий оранжевый; м — синевара ртутная; н — краплак красный.

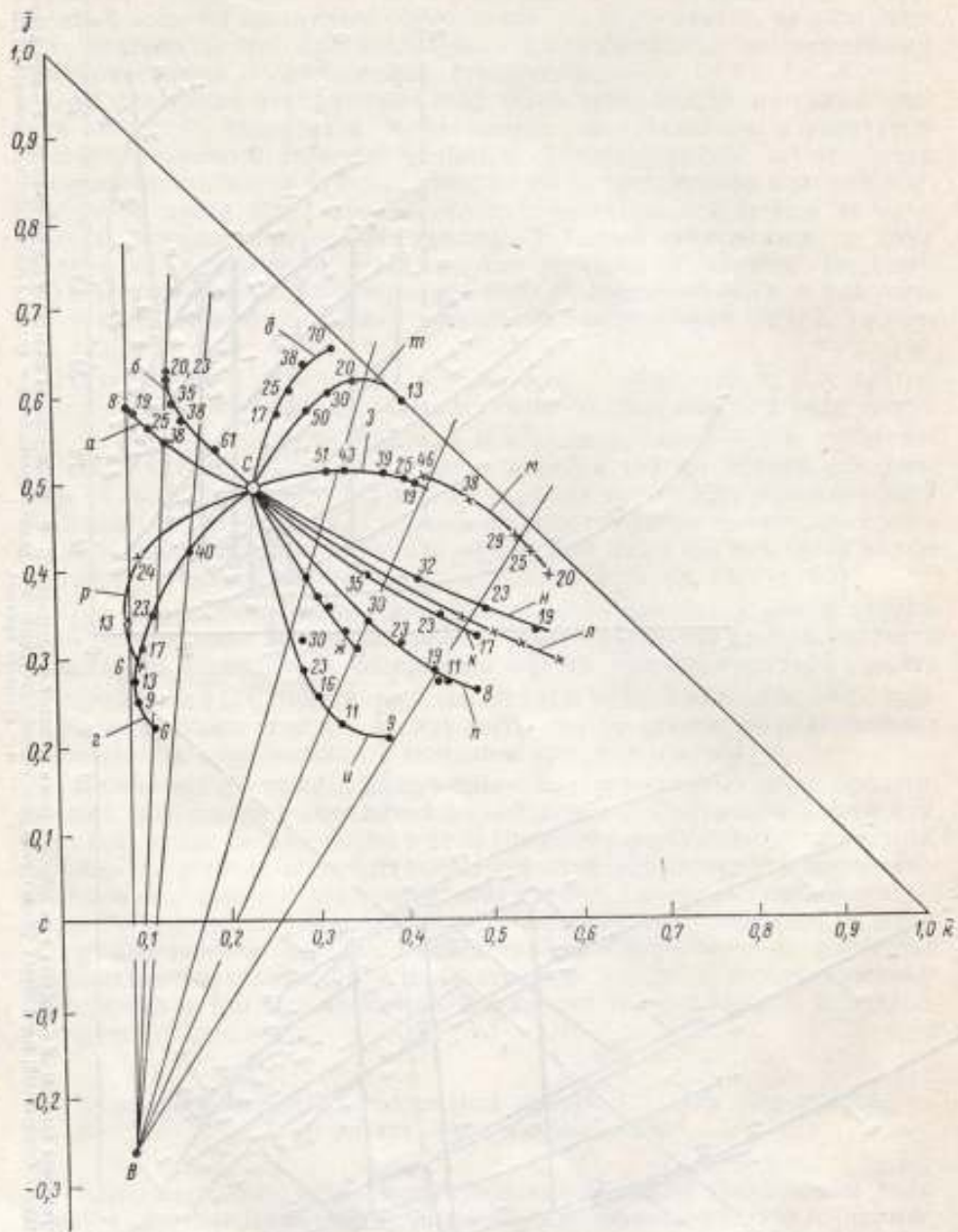


Рис. 2.

p — парижская смесь; *m* — калий желтый. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

менее равномерно, в результате чего получалось от пяти до десяти ступеней для каждой краски. Ступенчатые шкалы типографских красок были изготовлены 1-й Художественной литографией путем многократного впечатывания при смещении одного и того же оттиска. Ступенчатые шкалы из анилиновых красок изготавливались прокрашиванием фиксированной фотобумаги в постепенно разбавляемых растворах красителя.

Колориметрические характеристики ступенчатых шкал, изготовленных из масляных красок Ленинградского завода художественных красок с разбелкой цинковыми белилами для источников «С» и «А», представлены на рис. 1—4. Выбор цветов, не различаемых краснослепыми и зеленослепыми, осуществлялся с помощью рис. 1 и 3. На этих рисунках кривые разбелки пигментов представлены в виде двух проекций на плоскость kz (рис. 1, *a*, и рис. 3, *a*) и на плоскость kc (рис. 1, *b* и рис. 3, *b*). Степени разбелки красок отмечены номерами 1, 2, 3... и т. д. в порядке возрастания концентрации краски. Прямые, параллельные проекциям осей R и G физиологической системы, обозначены прерывистыми линиями.

При беглом взгляде на эти рисунки сразу же становится очевидным, что синие, желтые и оранжевые краски не годятся для построения таблиц, предназначенных для обнаружения протанопов и дейтеранопов. Так, например (рис. 1), ультрамарин и кадмий оранжевый в любых разбелках не дают нужных сочетаний между собой и с другими красками, потому что кривая изменения цвета кадмия оранжевого в проекции kc проходит значительно ниже других кривых. Кривая ультрамарина в проекции kc проходит слишком высоко. По тем же очевидным признакам не дают нужных сочетаний цветов парижская синяя и различные желтые пигменты.

Пары цветов, не различаемые краснослепыми и зеленослепыми, легко образовать из зеленых, пурпурных, красных и серых цветов. Очевидные примеры таких цветных пар отмечены на рисунках кружками для протанопов и квадратами для дейтеранопов. Такие пары цветов соединены отрезками прямых, параллельных проекциям осей R и G .

Пары цветов при дневном освещении

Для протанопов:

- 1) киноварь ртутная в разбелке 2 — окись хрома в разбелке 2,5;
- 2) киноварь ртутная в разбелке 1,5 — кобальт зеленый светлый в разбелке 6;
- 3) жженая кость в разбелке 3,5 — изумрудная зеленая в разбелке 3;
- 4) кадмий пурпурный в разбелке 1,2 — изумрудная зеленая в разбелке 2.

Для дейтеранопов:

- 1) изумрудная зеленая в разбелке 4 — краплак фиолетовый в разбелке 4,5;
- 2) жженая кость в разбелке 2 — краплак красный в разбелке 1.

Пары цветов при вечернем освещении

Для протанопов:

- 1) изумрудная зеленая в разбелке 4 — краплак фиолетовый в разбелке 3;
- 2) изумрудная зеленая в разбелке 6 — краплак фиолетовый в разбелке 6;
- 3) кобальт зеленый в разбелке 5 — жженая кость в разбелке 4,2.

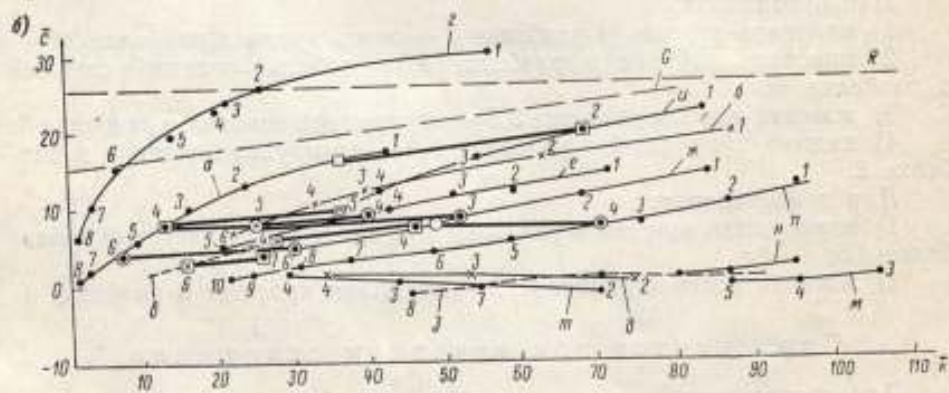
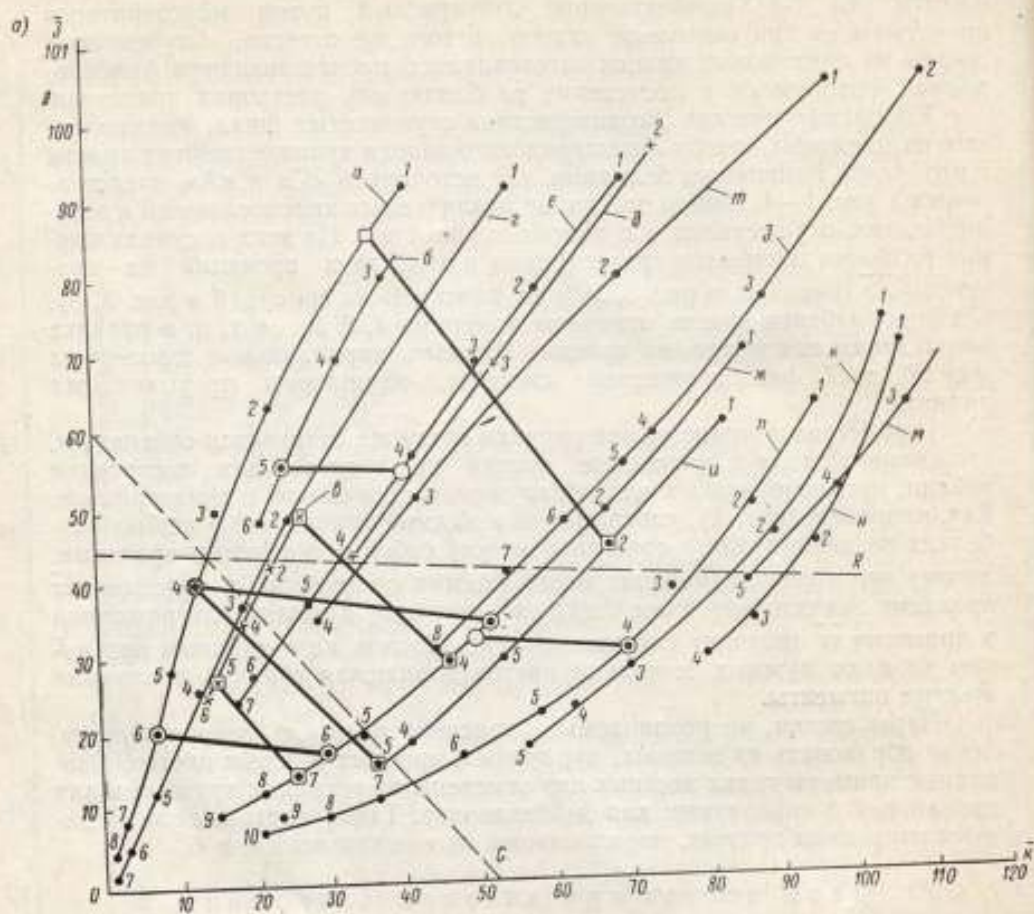


Рис. 3.

m — кизмий желтый. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

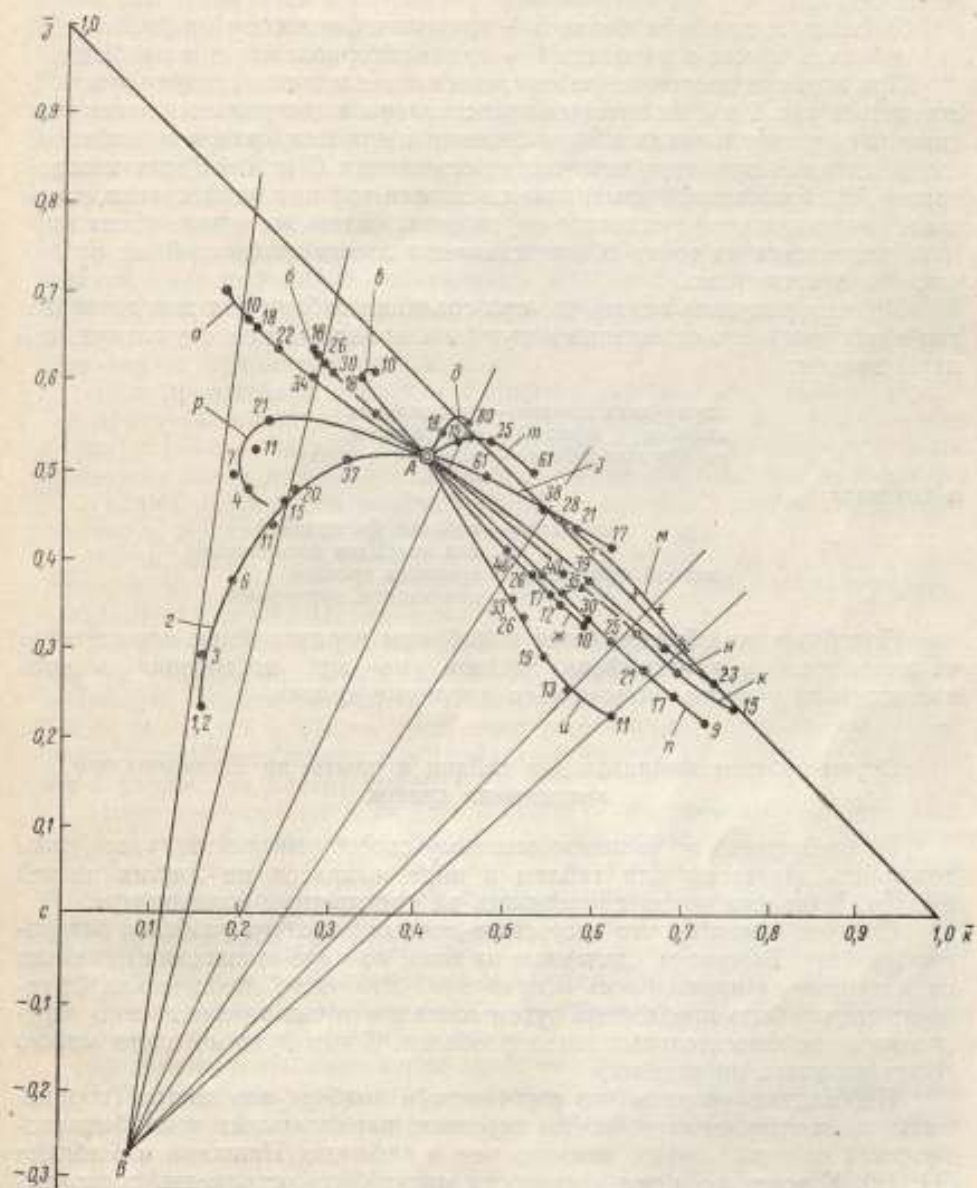


Рис. 4.

p — парижский спинаж; *m* — кадмий желтый. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

Для дейтеранопов:

- 1) изумрудная зеленая в разделке 1,2 — кобальт фиолетовый в разделке 4,2;
- 2) изумрудная зеленая в разделке 4 — кобальт фиолетовый в разделке 5;
- 3) окись хрома в разделке 5 — крапплак фиолетовый в разделке 7;
- 4) окись хрома в разделке 1 — крапплак фиолетовый в разделке 4.

При подборе цветов, не различаемых синеслепыми, следует руководствоваться рис. 2 и 4, на которых представлены в центральных проекциях (цветовых треугольниках *кэс*) изменения цветности красок с разделкой соответственно при двух источниках освещения *С* и *А*. Вдоль каждой кривой, изображающей изменение цветности той или иной краски, даны также значения коэффициентов отражения. Здесь же в виде веера прямых, исходящих из точки *В*, представлены линии цветностей, не различаемых синеслепыми.

Из этих рисунков видно, что при создании таблиц как для дневного, так и для вечернего освещения могут быть приняты за основу следующие пары красок:

изумрудная зеленая — ультрамарин
кобальт зеленый — ультрамарин
изумрудная зеленая — парижская синяя

а также:

охра золотистая — кобальт фиолетовый
или крапплак фиолетовый
кадмий оранжевый — крапплак красный
или кадмий пурпурный

Подобным же образом были подобраны неразличимые пары цветов из анилиновых и типографских красок, но для построения макета таблиц были использованы только масляные краски.

Осуществление выкрасок для таблиц и опыты по исследованию выцветания красок

Из отобранных по вышеизложенному способу масляных красок изготовлялись заготовки для таблиц в виде выкрасок на листах писчей бумаги. Выкраски потом проверялись на трехцветном колориметре.

Следует отметить, что отсутствие точных рецептов разделок затрудняло работу. Выкраски, сделанные на глаз, по мере высыхания изменяли свой цвет, и их приходилось исправлять. Это чисто техническая трудность может быть преодолена путем создания точно количественно определенных вспомогательных шкал разделок. Тогда нужные цвета можно будет получать по рецептам.

Необходимо указать, что неточности в подборе пар цветов (координаты не всегда лежат точно на отрезках, параллельных осям физиологической системы) много меньше, чем в таблицах Ишихара и Рабкина [11, 12]. К тому же и эти неточности могут быть устранены, поскольку известно, в каком направлении надо изменять цвета, чтобы достигнуть большего совершенства в подборе пар.

В трианопических таблицах пары цветов для испытания при дневном освещении (источник «С») подобраны более удачно, чем при вечернем освещении (источник «А»). Кроме того, при вечернем освещении синие цвета теряют насыщенность, а пурпурные становятся более красными. Поэтому пары цветов при вечернем освещении обладают меньшим цветовым различием.

Вопрос о влиянии неточности подбора цветов на результаты испытания цветного зрения остается пока невыясненным, так как погрешность колориметрических измерений дихроматов специально не исследовалась. Можно предполагать, что отсутствие чувствительности одного из приемников компенсируется обострением чувствительности двух других приемников. Следовательно, пары надо подбирать возможно точнее. В исследованиях автора [19, 20, 22] встречались среди дихроматов лица как с острым цветоразличением, из опытов с которыми направление физиологической оси определялось с малой погрешностью, так и малочувствительные, устанавливающие цветовые равенства с большим разбросом в отчетах. Вследствие огрубления порога цветоразличения, вызванного пятнистым способом оформления таблиц, точность подбора цветов для таблиц, очевидно, будет достаточна.

С целью выяснения сохранности диагностических свойств таблиц во времени были выполнены специальные исследования выцветания красок. Необходимость этих опытов была вызвана отсутствием каких-либо количественных данных о выцветании пигментов, в частности и на Ленинградском заводе художественных красок.

Были произведены следующие опыты. Кусочки, отрезанные от выкрасок, приготовленных для таблиц, были выставлены на солнце (на крышу) в июле — августе и оставались там в общей сложности 60 часов. Облучение такой длительности явилось чрезмерно жестким испытанием для таблиц. Но с этого необходимо было начать, чтобы наблюдать явление в достаточно отчетливом виде.

Затем были выполнены сравнительные измерения на трехцветном колориметре образцов выкрасок, хранимых в темноте (в пакетах), и образцов, облученных на солнце.

Не приводя здесь результатов этих измерений, ограничимся лишь общими выводами. Итоги измерений позволяют сделать следующее заключение: цвета пигментов Ленинградского завода художественных красок оказались в общем достаточно устойчивыми; наибольшему изменению подверглись пурпурные (кобальт и краплак) и синие (ультрамарин и парижская синяя) краски.

Пурпурные синеют и светлеют, синие — обесцвечиваются. Эти изменения красок больше всего сказываются на парах цветов, не различаемых тританопами и дейтеранопами. В результате выцветания красок почти все первоначально подобранные сочетания цветов для тританопических таблиц оказались неудовлетворительными. Сопоставление результатов последних измерений с первоначальными показало, что в темноте краски тоже несколько меняются. По утверждению работников Ленинградского завода художественных красок, такие изменения возможны за счет изменений в олифе.

Можно принять следующие практические выводы:

1) через определенные промежутки времени, которые необходимо установить в дополнительных опытах, краски в таблицах следует обновлять;

2) направление изменения цветов красок следует учитывать и соответственным образом выбирать допуск при составлении сочетания цветов для таблиц;

3) синие и фиолетовые краски со временем имеет смысл заменить более светостойкими.

Оформление таблиц

Оформление таблиц является задачей столь же важной, как и подбор правильных цветовых сочетаний.

В отличие от существующих таблиц желательно оформить новые таблицы в таком виде, чтобы явления физиологические (недостаточность цветного зрения) были отделены от явлений чисто психологических (способность наблюдателя объединять образ из разрозненных элементов), чего нет в существующих таблицах. Такого рода соображения приходилось слышать от Н. Д. Ньюберга, Г. Н. Раутиана и П. М. Тиходеева.

Основное назначение таблиц состоит в обеспечении четкого распознавания трех основных форм цветовой слепоты к красным, зеленым и синим цветам при исключении индивидуальных особенностей зрения каждого наблюдателя в пределах его группы. Последнее обстоятельство не позволяет оформить испытания в виде прилегающих пар цветов. Так как эти пары подбираются для некоторого среднего типичного цветнослепого, то каждый отдельный цветнослепой в силу индивидуальных особенностей его зрения будет улавливать разницу и не назовет поля одинаковыми. Диагноз не будет четким. Цветнослепой будет находиться, примерно, в таком положении, как нормальный наблюдатель при оценке малых цветовых различий. Ответ «одинаковы» или «неодинаковы» будет зависеть от степени придирчивости наблюдателя и его добросовестности. Объективной стороной восприятия цветовых различий является опознавание фигур и цифр. Однако изготовление фигур на фоне с тесно примыкающей границей связано с чрезвычайно большими техническими трудностями. Их можно было бы избежать путем наложения одной краски поверх другой, но при таком способе необходимо применять крошечные краски, которые всегда бывают тусклыми. К тому же этот способ может не дать желаемого результата опять же по причине индивидуальных особенностей зрения наблюдателя. Поэтому проще разбить картину на ряд отдельных элементов, увеличивая тем самым порог цветоразличения, что и применяется на практике.

В таблицах иностранных авторов и Е. Б. Рабкина, изготовленных типографским способом, фигура и фон состоят из отдельных мелких кружков различного размера («горошка»). Кроме этого, в них еще применяется своеобразный «камуфляж»: на фигуру и фон, которые не должен различать дихромат, наносят пятна посторонних цветов с той целью, чтобы сбить испытуемого. Эта пестрота, вызывающая ошибки психологического характера, представляется излишней и потому в предлагаемых таблицах не применялась.

Как уже упоминалось выше, испытательные таблицы (полихроматические и псевдонзохроматические) обычно выполняются типографским способом. Выцветание красок и загрязнение таблиц при употреблении довольно скоро выводят их из строя и показатели получаются недостоверными. Кроме того, получение типографским способом нужных цветов достаточно однородных по всей таблице или от экземпляра к экземпляру является затруднительным. Трудность представляют и колориметрические контрольные промеры цвета на маленьких участках — цветных пятнах.

В данной работе был применен способ оформления таблиц в виде дырчатого трафарета из бумаги (можно также применять тонкий листовый металлический материал, пластмассу и т. п.), который накладывается на листовую же подложку. Между трафаретом и подложкой закладывается окрашенная бумага или ткань, образующая основной фон таблицы. Поверх этого фона под трафарет закладывают вырезанную из такого же материала, но другого надлежаще подобранного цвета фигуру желаемой формы.

Такой способ оформления таблиц обладает рядом преимуществ. Он обеспечивает равномерность каждого данного цвета на таблице, одина-

ковость цветов от экземпляра к экземпляру, легкую доступность для колориметрического контроля и, наконец, возможность восстановления исходных цветов в случае их износа и порчи, так как к таблицам может быть всегда приложен запасной цветной материал в достаточном количестве. В этом способе, кроме того, предусмотрена возможность быстрых и произвольных изменений очертания фигур, т. е. рисунка таблиц, что исключает возможность их заучивания.

Вопрос о форме фигур в таблицах также является весьма существенным, так как необходимо учитывать возможность испытания детей и неграмотных. Новые таблицы осуществлены в виде колец Ландольта. На преимущество этого способа оформления было указано А. Б. Флеккелем. В разных таблицах прорези колец были расположены по-разному: вниз, вверх, вправо, влево, в первый, второй, третий и четвертый квадранты. Кроме того, чтобы изменить положение прорези, достаточно повернуть таблицу. Возможность заучивания таблицы при этом полностью устраняется. Задача испытуемого заключается в указании прорези в кольце, что одинаково легко для любого человека, независимо от степени его умственного развития.

Вопрос о цвете наружной стороны трафарета также имеет существенное значение. Из общих соображений следует, что цвет трафарета должен быть «неутомляющим» серым с коэффициентом отражения 40—60%. Однако при более темных цветах таблицы трафарет следует делать темнее, при светлых — более светлым.

С целью выяснения роли трафарета и влияния его окраски на результаты чтения таблиц был выполнен следующий качественный опыт. Серое кольцо Ландольта, имеющее небольшой, но совершенно четко различаемый контраст с белым фоном, накрывалось поочередно пятью трафаретами, — черного, белого, голубого, розового и зеленого цветов. Под белым трафаретом кольцо Ландольта было видно совершенно отчетливо, розовый несколько ухудшал различаемость, зеленый ухудшал ее еще сильнее. Под голубым трафаретом оно было совсем плохо видно и под черным еле обозначалось. Правда, среди наблюдателей с нормальным цветным зрением были люди как с более острой, так и с притупленной чувствительностью глаза к яркостному контрасту и оценки их соответственно смещались.

Несомненно, что ширина промежутка между отверстиями в трафарете тоже влияет на цветоразличение. Подобного рода довольно сложные влияния предполагалось исследовать в дальнейшем в целях обоснования рационального выбора трафарета. Необходимо также уточнить условия чтения таблиц в смысле задания угла зрения или наиболее выгодного расстояния от глаза наблюдателя.

Кроме того, предполагалось разработать некоторые другие способы оформления испытаний, так как ввиду большого разнообразия конкретных зрительных задач испытание одним способом не может дать исчерпывающего ответа о пригодности или непригодности испытуемого для их выполнения.

Итоги проверки таблиц на практике и обсуждение результатов

Правильность подбора цветов в таблицах может быть объективно оценена путем испытания дихроматов. Строго говоря, принадлежность того или иного наблюдателя, выступающего в качестве эксперта при оценке таблиц, к числу дихроматов должна быть определена независимым колориметрическим способом, изложенным в работе Н. Д. Ньюберга

[18] и примененном автором [20, 22] для определения осей физиологической системы, или при помощи аномалоскопа ГОИ [10].

Из-за отсутствия таких наблюдателей пришлось ограничиться использованием двенадцати цветослепых, отобранных при помощи таблиц Ишихара.

Последующее их испытание с помощью новых таблиц привело к сравнительным результатам, представленным в протоколах № 1 для дневного и № 2 для вечернего освещения.*

Протокол № 1

Инициалы испытуемого	Диагноз по таблицам Ишихара	№ таблиц							
		протанопических			дейтеранопических			тританопических	
		1	2	3	1	2	3	1	2
А. И. С.	Краснослепой . . .	-	-	-	+	+	+	+	+
В. Г. М.	" . . .	-	-	+(-)	+(-)	+(-)	+(-)	+	+
М. А. И.	" . . .	-	-	-	+(-)	+(-)	+(-)	+	+
Р. В. Л.	" . . .	±	-	±	+	+	+	+	+
А. Е. Д.	Зеленослепой . . .	+	+	+	-	-	-	+	+
Д. И. М.	" . . .	+	+	+	-	-	-	+	+
В. Н. Н.	" . . .	+	+	+	+	+	-	+	+
Г. Н. Ф.	" . . .	+	+	+	+(-)	+(-)	+	+	+
В. П. З.	Цветослабый . . .	+	+	+	+(-)	+(-)	+	+	+
А. Д.	" . . .	+	+	+	+	+	+	+	+
В. А. Т.	Зеленослабый . . .	+	+	+	±	+	-	-	-
К. А. М.	Монохромат . . .	±	+	+	-	-	-	+	+

Протокол № 2

Инициалы испытуемого	Диагноз по таблицам Ишихара	№ таблиц								
		протанопических			дейтеранопических				тританопических	
		1	2	3	1	2	3	4	1	2
А. И. С.	Краснослепой	-	-	-	+	-	+	-	+	+
В. Г. М.	"	+	-	-	+	-	+	-	+	+
М. А. И.	"	+	-	-	+	+	+	-	±	±
Р. В. Л.	"	+	+	-	+	+	+	+	+	+
А. Е. Д.	Зеленослепой	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Д. И. М.	"	+	+	+	-	-	+	-	+	+
В. П. З.	Цветослабый	+	+	+	+	+(-)	+	+(-)	+	+
А. Д.	"	+	+	±	-	-	+	-	+	+

* Вопрос о наиболее выгодном уровне освещенности для проведения испытаний цветного зрения пока специально не исследовался.

Испытание каждой формы цветной слепоты производилось на нескольких тестах, которые условно обозначаются цифрами 1, 2, 3 в соответствующих столбцах.

Были приняты следующие условные обозначения ответов испытуемых: если наблюдатель правильно называл прорезь в кольце Ландольта, то результат оценивали знаком +; если же он ошибался или говорил «ничего нет», то знаком —; если наблюдатель все же различал очертания кольца, но прорези не видел или находил с большим трудом после долгого рассматривания, то его ответ регистрировали двойным знаком ±; если он читал таблицу правильно, с легкой запинкой, то это отмечали знаком +⁽⁻⁾.

Результаты сопоставления итогов испытания одних и тех же лиц по макету новых таблиц и таблицам Ишихара сводятся к следующему. Таблицы макета в общем сразу указывают тип цветовой слепоты наблюдателя. Кроме того, внутри самих групп они дают дополнительную дифференциацию испытуемых. Так, например, лица, определенные по таблицам Ишихара как протанопы, по-разному читают протанопические таблицы макета. Протаноп Р. В. Л. не читает только одну таблицу макета из протанопических, а именно: № 2 при дневном освещении и № 3 при вечернем освещении, остальные протанопические таблицы он читает сразу же и безошибочно или при разглядывании все-таки находит прорезь в кольце. Наоборот, протанопы В. Г. М. и М. А. И. с запинкой читают дейтеранопические таблицы. То же можно сказать и о дейтеранопях.

Можно предполагать, что случаи нечеткого диагноза обуславливаются следующими причинами: 1) неточностью подбора цветов; 2) пониженностью (редукцией) у дихроматов чувствительности еще другого приемника; 3) неполной дихромазией испытуемого.

Несомненно различие показаний таблиц Ишихара и нового макета, кроме того, определяется различием в способе оформления, а именно, отсутствием в макете таблиц дополнительной пестроты, которая в таблицах Ишихара сбивает цветослабых, объединяя его с дихроматами в одну группу.

Цветослабые не выявляются таблицами макета, они видят прорези в кольцах Ландольта и лишь несколько затрудняются при чтении таблиц с мало смещенными для дихроматов цветами.

Чтобы вынести более определенное суждение о качестве таблиц, необходимо произвести проверку их на большом числе дихроматов. Но и при небольшом числе испытуемых результат проверки ясно показывает возможность построения таблиц, где цветовые различия, в соответствии с предложением Г. Н. Раутиана в 1948 г., возрастали бы по ступеням через определенное число порогов. Такие таблицы могут обеспечить дифференцированную оценку недостатков зрения от слабых форм по дихромазии.

В пробном экземпляре таблиц ВНИИМ различие между цветами каждой пары не фиксировалось числом порогов. Правда, в них, с одной стороны, осуществлялись пары сильно отличающихся друг от друга цветов: при дневном освещении такие, как зеленый — пурпурный (пары № 1 и 2 для дейтеранопов) и зеленый — красный (пары № 1, 2 и 3 для протанопов), а с другой стороны, — пары менее отличающихся цветов, такие, как пурпурный — серый (пара № 3 для дейтеранопов); но эти различия между цветами являются случайными. Пары цветов для испытания при вечернем освещении (№ 3 для протанопов и № 4 для дейтеранопов) были изготовлены специально с мало смещенными соответственно вдоль осей *R* и *G* цветами. Они определяют тип

слабого дефекта (наблюдатель Р. В. Л.) и редукцию других приемников у дихроматов А. И. С., В. Г. М., М. А. И. и А. Е. Д.

При проверке таблиц наблюдался следующий интересный факт. Цветослепым предлагалось читать серую таблицу с белым и черным трафаретами. Оказалось, что таблицу с черным трафаретом некоторые дихроматы вовсе не читали, иные затруднялись, а испытуемый В. Г. М., очень плохо различающий цветные таблицы (протаноп с редукцией приемника G), прочитал эту таблицу без затруднения. Этот случай заслуживает внимания. Острое восприятие яркостного контраста у данного наблюдателя, по-видимому, можно объяснить особо обостренной чувствительностью третьего приемника В.

Заключение

Выполненное исследование прежде всего показывает роль и значение научной колориметрии при решении такой практической задачи, как разработка способов испытания цветного зрения для профессионального отбора.

Благодаря развитию колориметрии область зрительных восприятий, которая до сих пор в значительной степени находилась в ведении психологов и врачей-офтальмологов, приобретает прочную техническую основу и становится доступной метрологическому контролю.

В данной работе подбор цветов для таблиц осуществляется не вслепую (путем проб и подгонок), как это практиковалось ранее, а методически, на основе колориметрических данных о цветном зрении средних типичных цветослепых.

Новый способ оформления таблиц в виде колец Ландольта с применением дырчатого трафарета также обладает рядом технических преимуществ перед способом типографского оформления. В этом способе обеспечивается равномерность цвета по таблице, одинаковость цветов от экземпляра к экземпляру, возможность восстановления таблиц, а кроме того, исключается возможность их заучивания. Сознательное устранение излишней пестроты уменьшает роль психологических факторов и делает таблицы более надежным средством испытания непосредственно свойств цветного зрения.

Примененная методика подбора цветов и способ оформления таблиц позволяют очень просто установить метрологический контроль за неизменностью их диагностических свойств по мере износа.

Конкретным результатом работы явилось изготовление двух пробных образцов таблиц для испытания при дневном и вечернем освещении.

Необходимо отметить, что в пробных таблицах, изготовленных простыми средствами, есть ряд чисто технических и легко устранимых недостатков, как например: неправильности в подборе цветов и загрязненность цветов, плохое качество изготовления трафаретов, а также блеск красок и покровных стекол.

Несмотря на эти недостатки пробных образцов таблиц, предварительные опыты по их проверке дали в общем положительные результаты. Опыты вполне определенно показали, что таблицы определяют тип цветовой слепоты. Они являются более рациональными по сравнению с иностранными таблицами и таблицами Рабкина, так как не требуют бесполезных испытаний, указывающих только на наличие дефекта и напрасно удлиняющих время проведения испытания. По существу для практических целей и массовых испытаний необходимо и доста-

точно иметь три типичные таблицы из каждого набора, наиболее удачные по подбору цветов.

Опыт построения макета показал возможность изготовления таблиц, которые давали бы количественную оценку цветослабости числом порогов цветоразличения.

Дальнейшее усовершенствование таблиц возможно по пути: 1) рационализации выбора размеров и окраски трафаретов; 2) количественной разработки рецептур красок и 3) установления допусков и погрешностей при подборе цветов. Завершением работы должно явиться установление цветовых стандартов для таблиц и осуществление проверок сохранности их цветовых характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раутиан Г. Н., Исследование цветного зрения 995 человек, ДАН, № 6, т. 74, 1950, стр. 1073.
2. Барбель И. Э., Клинические исследования по цветовому чувству, Докторская диссертация, Л., 1943.
3. Shuster A., «Roy. Soc. Proc.», v. 48, 1890, p. 140.
4. Schmidt J., «Zs. Bahnarst», Bd. 31, 1936, S. 44.
5. Waaler G. H. M., «Acta Ophthalm.», Kbh. 5, 1924, p. 301.
6. Planta P., «Arch. Ophthalm.», Kbh. 120, 1928, p. 255.
7. Nelson J. H., «Proc. Physic. Soc.», v. 50, 1938, p. 661.
8. Chan E. and Mao W. S., «Britist. Journ. Ophthalm.», № 12, v. 34, 1950, p. 744.
9. Юстова Е. Н., К вопросу о природе цветного зрения аномальных трихроматов, ДАН, № 6, т. XXXI, 1951, стр. 1051.
10. Раутиан Г. Н., Новый аномалоскоп, ДАН, № 1, т. 73, 1950, стр. 99.
11. Ichihara S., «Tests for colour blindness», 7 edit., 1936.
12. Рабкин Е. Б., Полихроматические таблицы для исследования цветоощущения, 4-е издание, Медгиз, 1946.
13. Юстова Е. Н., Колориметрический анализ таблиц Исихара и Рабкина, Проблемы физиологической оптики, т. 12, 1958, стр. 511.
14. Кравков С. В., Глаз и его работа, 4-е издание, 1950, стр. 293.
15. Hardy L. H., Rand G. and Rittler M. C., «JOSA», v. 35, 1945, p. 481.
16. Murray E., «JOSA», v. 33, 1943, p. 318.
17. Dimmick F. K., «JOSA», v. 33, 1943, p. 309.
18. Нюберг Н. Д., Новый способ определения положения основных физиологических цветов из опытов с цветнослепыми, ДАН, № 4, т. 63, 1948, стр. 379.
19. Юстова Е. Н., Новое определение спектральных характеристик цветного зрения, ДАН, № 5, т. 65, 1949, стр. 661.
20. Юстова Е. Н., Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветнослепыми, ДАН, № 4, т. 63, 1948, стр. 383.
21. Нюберг Н. Д., Определение положения в цветовом треугольнике основного синего цвета, ДАН, № 2, т. 65, 1949, стр. 159.
22. Юстова Е. Н., Спектральная чувствительность приемников глаза, ДАН, № 6, т. 74, 1950, стр. 1069.
23. Раутиан Г. Н., К вопросу о классификации форм цветного зрения, ДАН, № 5, т. 81, 1951, стр. 815.

Поступила в редакцию
30/XI 1959 г.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ШКАЛЫ КАНИФОЛИ

В статье описывается опыт создания стеклянной шкалы канифоли во ВНИИМ по образцу английской шкалы с учетом спектрофотометрических характеристик естественной канифоли отечественного производства.

Различные цветные шкалы широко применяются в промышленности для контрольно-измерительных целей. Однако они могут иметь и более важное назначение как надежное средство для осуществления постоянства и единства цветовых измерений в стране. Для этого необходимо, чтобы шкалы были неизменными по цвету и были аттестованы спектрофотометрическими и колориметрическими характеристиками в одном из институтов системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. По мере развития фотоэлектрических методов компарирования цветов, позволяющих с высокой степенью точности количественно оценивать малые цветовые различия в градации цветов, ступенчатые шкалы будут исполнять роль набора цветных «эталонов».

В целях удовлетворения нужд отечественных канифольно-терпентиновых предприятий во ВНИИМ по заданию Главлеспрома был создан образец стеклянной шкалы канифоли с целью замены шкалы естественной канифоли.

Шкала естественной канифоли Главлеспрома представляет собой набор кубиков (с длиной ребра 2,5 см) и состоит из двенадцати ступеней, осуществляющих переход от низшего сорта к высшему. В ней приняты обозначения ступеней, применяемые в западных странах: D, E, F, G, I, H, K, M, N, W_g, W_w и X, в порядке улучшения сорта.

За границей уже используется стеклянная шкала, разработанная в Англии. Образец такой шкалы, изготовленной в ФРГ, вместе с образцом немецкой шкалы естественной канифоли и шкалой Главлеспрома был передан во ВНИИМ для исследования и руководства при составлении стеклянной шкалы канифоли. Сорта стекол, равно как и цветовые характеристики этих шкал, не были известны.

Для удобства практического использования образцы стеклянной шкалы канифоли должны совпадать по цвету с образцами естественной канифоли при любом источнике освещения, например: лампах накаливания, люминесцентном освещении и при естественном дневном свете. Поэтому необходимо было стремиться к получению не только идентичности цветов, но и спектров пропускания копии и оригинала, т. е. при осуществлении шкалы воспользоваться спектрофотометрическим методом исследования.

Все спектрофотометрические измерения были проведены на фотоэлектрическом регистрирующем спектрофотометре СФ-2М.

Первоначально были измерены спектральные коэффициенты пропускания всех трех шкал. Эти данные позволили определить различия в спектрах пропускания между образцами естественной канифоли и стеклянной шкалы и далее руководствоваться этими различиями как допусками при воспроизведении кривых с помощью стекол.

Было решено воспроизводить английскую стеклянную шкалу (изготовленную в ФРГ), поскольку ею пользуются во внешней торговле, допуская отступления в сторону естественной канифоли отечественного производства.

Результаты спектрофотометрических исследований всех двенадцати ступеней шкал представлены на рис. 1—6. Длинными штрихами проведены кривые коэффициентов пропускания образцов иностранной стеклянной шкалы, короткими штрихами — немецкой канифоли и пунктиром — отечественной канифоли.

По каталогу отечественного стекла был произведен предварительный выбор сортов стекол, расчет их толщины и составление таких комбинаций стекол, которые воспроизводили бы спектрофотометрические кривые коэффициента пропускания образцов иностранной стеклянной шкалы в области видимого спектра.

После получения стекол с завода пришлось внести некоторые коррективы в расчет толщин.

Окончательные результаты подбора стекол для каждого элемента шкалы приведены в левой части таблицы.

Обозначение образцов шкалам	Марки стекол	Толщина стекла, мм	Стекла, шкала ВНИИМ			Стекла, шкала английская		
			x_B	y_B	z_B	x_B	y_B	z_B
<i>D</i>	ПС-8	1,5	0,682	0,318	0,5	0,686	0,314	0,4
	ОС-16	12,0						
	НС-9	0,5						
<i>E</i>	ПС-8	2,5	0,674	0,326	1,3	0,676	0,324	1,1
	ОС-16	8,5						
<i>F</i>	ОС-16	7,4	0,641	0,358	3,8	0,635	0,363	3,7
	ПС-8	0,8						
<i>G</i>	ПС-5	7,0	0,611	0,386	7,0	0,623	0,376	8,1
	ОС-5	6,8						
<i>I</i>	ОС-5	4,3	0,581	0,412	18,8	0,560	0,425	21,6
<i>H</i>	ОС-16	4,9	0,577	0,417	13,6	0,590	0,407	13,4
<i>K</i>	ЖЗС-10	5,0	0,550	0,429	26,3	0,541	0,440	27,1
	ОС-5	3,0						
<i>M</i>	ОС-16	2,4	0,529	0,446	30,4	0,525	0,451	29,5
	ЖС-3	4,0						
<i>N</i>	ОС-16	1,2	0,507	0,459	42,6	0,503	0,460	38,4
	ЖС-3	7,0						
	ЖС-11	3,0						
	ЖС-12	5,0						
W_g	ОС-16	1,1	0,491	0,456	47,0	0,489	0,461	41,8
	ЖС-3	7,0						
W_w	ОС-16	0,9	0,486	0,456	48,9	0,476	0,464	48,4
	ЖС-3	7,0						
<i>X</i>	ОС-5	1,0	0,464	0,459	56,5	0,463	0,460	51,8
	ЖС-3	7,0						

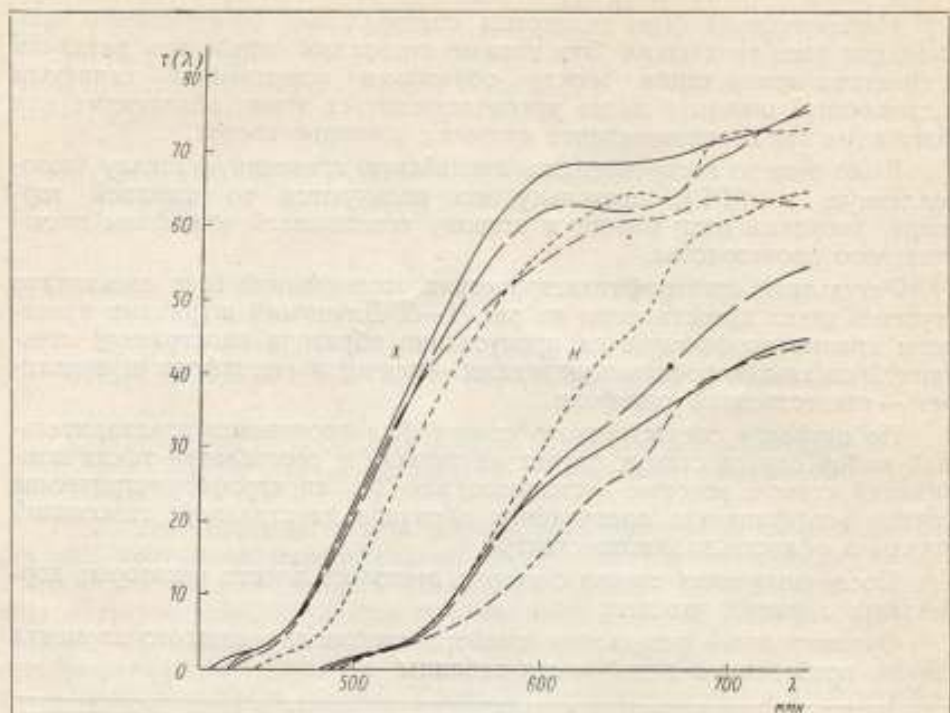


Рис. 1.

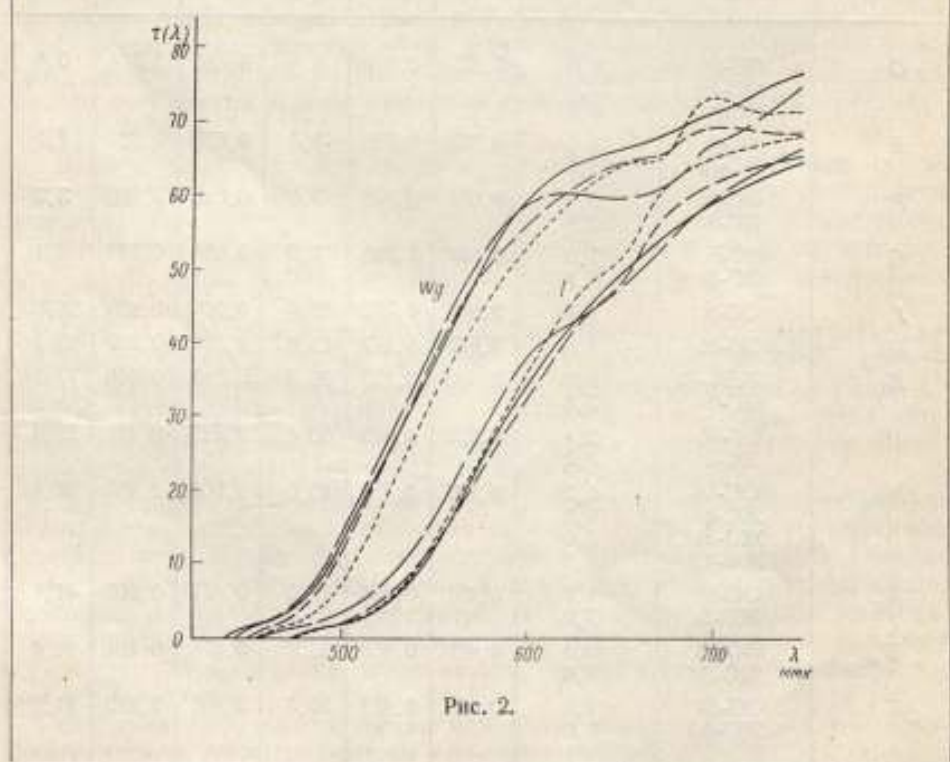


Рис. 2.

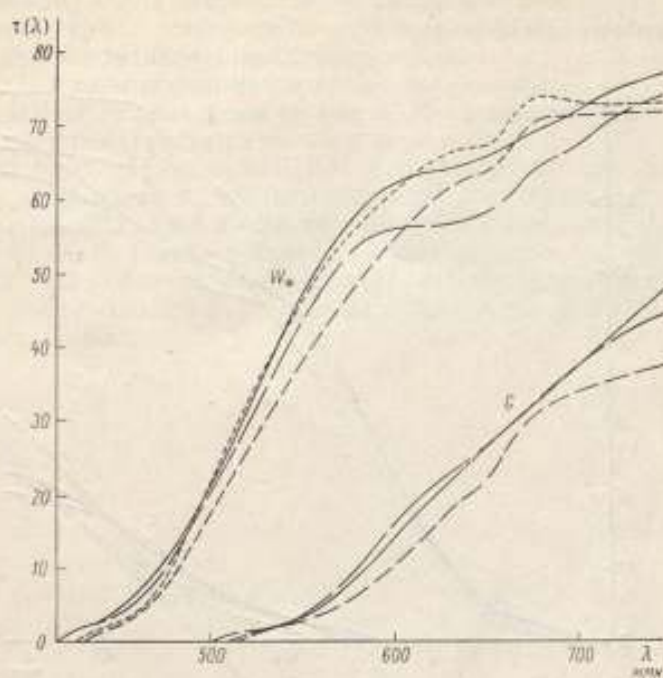


Рис. 3.

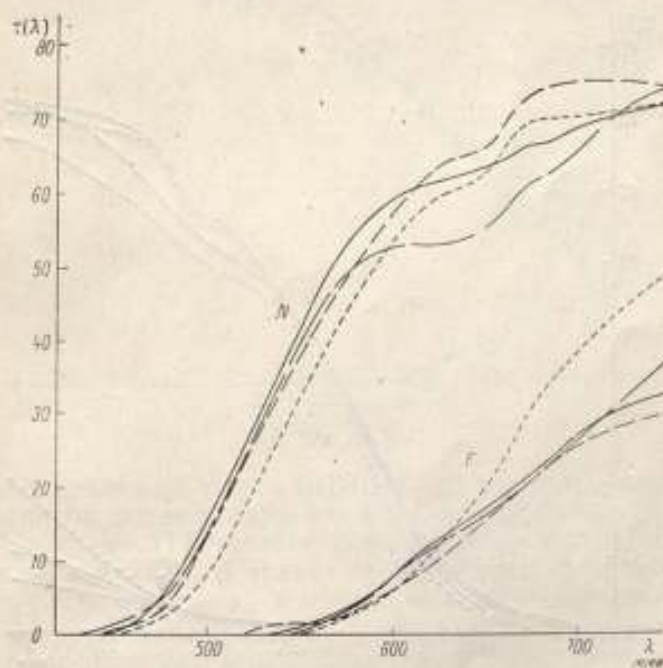


Рис. 4.

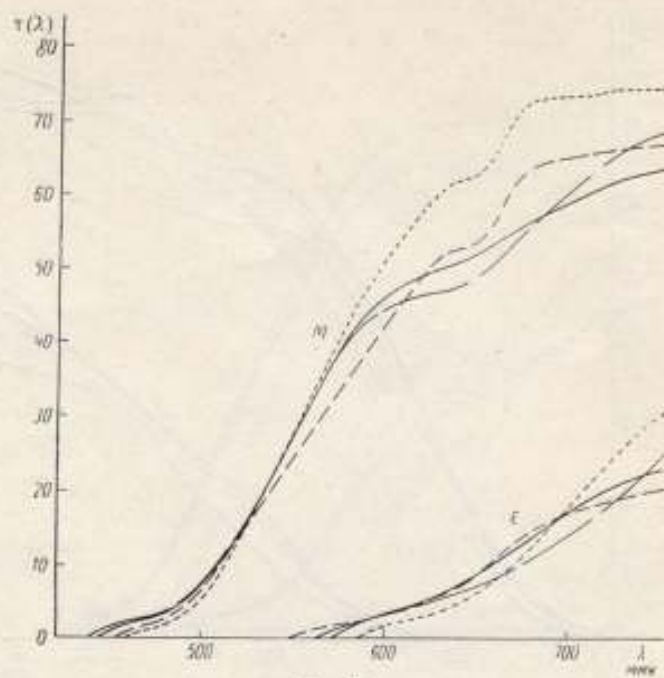


Рис. 5.

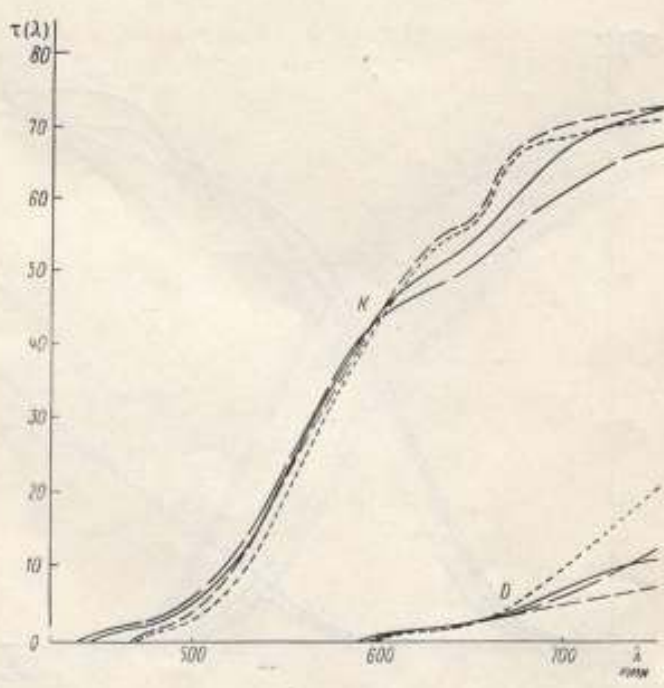


Рис. 6.

Стекла, входящие в состав каждого образца, были склеены канадским бальзамом, и для выравнивания толщин, чтобы придать образцу форму кубика, как в естественной шкале канифоли, наклеивались на подложку из бесцветного стекла марки К-8.

Результаты спектрофотометрического исследования образцов пробной шкалы ВНИИМ приведены на рис. 1—6 сплошными линиями.

В большинстве случаев различия в ходе кривых коэффициентов пропускания пробных образцов ВНИИМ и образцов иностранной стеклянной шкалы не выходят за пределы различий, имеющих между иностранной стеклянной шкалой и естественной канифолью. Заметные расхождения наблюдаются только в красном конце спектра у образцов *I*, *N* и *W_г*. Но в этой области спектральная чувствительность глаза резко снижается, ввиду чего эти расхождения существенно не сказываются на визуальных оценках.

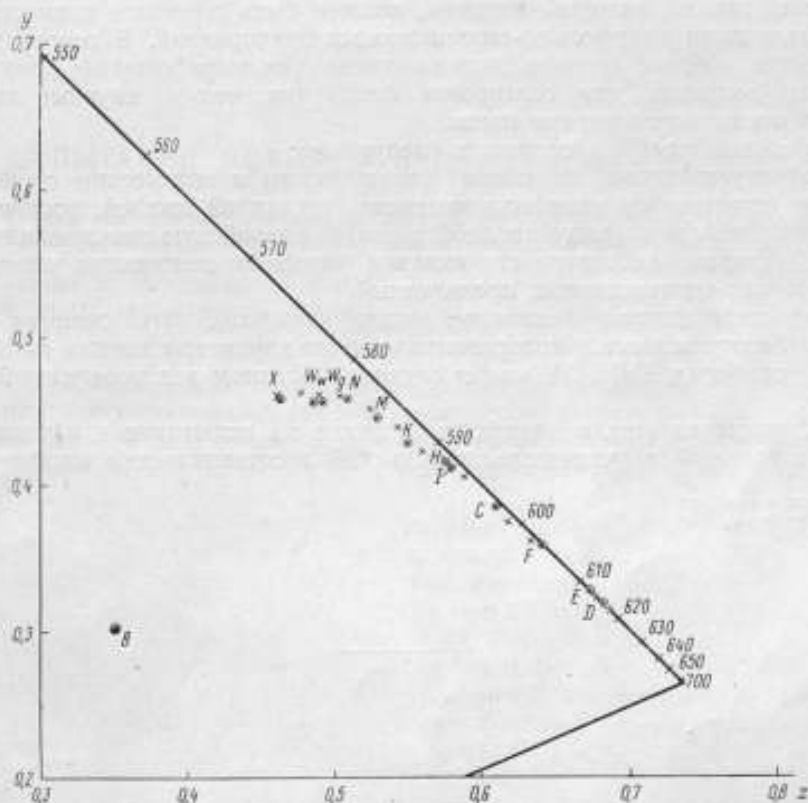


Рис. 7.

Образец стеклянной шкалы ВНИИМ был аттестован также колориметрическими характеристиками для источника дневного света *B* в международной системе *XYZ*, которые были получены в результате расчета по известным формулам. В правой части таблицы приведены значения координат цветности x_B , y_B и общего коэффициента пропускания τ_B . На рис. 7 эти результаты представлены графически в цветовом треугольнике международной системы *XYZ* в виде кружков. График иллюстрирует непрерывный переход цветового тона от насыщенного оранжево-красного к желтому (с потерей насыщенности цвета) по мере улучшения качества канифоли.

Кроме того, в таблице и на рис. 7 (крестиками) даны для сравнения координаты цветности и коэффициенты общего пропускания ступеней английской стеклянной шкалы.

В большинстве случаев цветовые различия соответствующих образцов стеклянных шкал — английской и пробной ВНИИМ — не являются существенными, так как они лежат в пределах погрешности цветовых измерений. Исключение составляют ступени *H* и *I*, которые в пробной шкале получились практически совпадающими по цветности, в то время как те же самые ступени английской шкалы заметно отличаются друг от друга. Причина расхождения между английской и пробной шкалой ВНИИМ в этой части объясняется тем, что сорта *H* и *I* отечественной канифоли, ход спектрофотометрических кривых коэффициента пропускания которых учитывался при создании пробного образца, очень похожи друг на друга. Поэтому возникает вопрос о более рациональном выборе ступеней шкалы, который, впрочем, должен быть разрешен совместно со специалистами канифольно-терпентиновых предприятий. В основу решения этого вопроса должны быть положены как выработанные практикой нормы допусков при сортировке продукции, так и научные данные о порогах цветоразличения глаза.

Результат работы состоит в следующем:

а) неустойчивая по своим механическим и оптическим свойствам шкала естественной канифоли заменена стеклянной шкалой, воспроизводящей принятую в международной торговле английскую шкалу канифоли;

б) указана рецептура составления подобных стеклянных шкал для канифольно-терпентиновых предприятий;

в) отечественная стеклянная шкала канифоли, аттестованная спектрофотометрическими и колориметрическими характеристиками на образцовых приборах ВНИИМ, может служить образцом для проверки рабочих шкал.

Стеклянная шкала канифоли передана на испытание и заключение в Центральный научно-исследовательский лесотехнический институт.

Поступила в редакцию
30/XI 1959 г.

Г. И. РАУТИАН

Председатель колориметрической комиссии
при ВНИИМ

ИСПЫТАНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИЙ СЛОЖЕНИЯ ЦВЕТОВ

Статья представляет содержание доклада на Бюро постоянной колориметрической комиссии при ВНИИМ о некоторых испытаниях новых функций сложения спектральных цветов. Приведены результаты испытаний, выполненных Н. И. Сперанской и Н. В. Лобановой путем сравнения расчетных и экспериментальных значений цветовых координат для ряда цветных светофильтров.

На брюссельской сессии Международной комиссии по освещению в 1959 г. рассматривался вопрос о принятии новых значений координат цветов спектра для 10-градусного поля зрения, предложенных Джаддом на основе объединения результатов работ Стайлса-Бэрча (Англия) и Н. И. Сперанской (СССР).

Результаты проверочных опытов Выщецкого [1] и Стайлса и Выщецкого [2], доложенные на этой сессии, явились поводом к тому, что было решено продолжить проверку разными методами. В связи с этим Бюро постоянной комиссии по колориметрии при ВНИИМ рассмотрело результаты некоторых проверочных испытаний, выполненных в ГОИ Н. И. Сперанской и Н. В. Лобановой. Проверка заключалась в определении координат цветности девяти светофильтров расчетным путем на основе спектрофотометрических измерений и новых функций сложения и в сопоставлении этих данных с результатами измерений, произведенных девятью наблюдателями на трехцветном колориметре с полем зрения 10° .

Метод, примененный в этих сравнениях, отличался от метода Выщецкого [1] в способе градуировки колориметра, так как применялась градуировка по способу Лобановой [3] и по способу «четырёх цветностей».

На первый взгляд может показаться, что эти два близкие друг другу способа должны приводить к заведомо хорошему согласию с расчетными данными и потому не могут применяться для подобных проверок. Однако оба эти способа дают индивидуальные градуировочные уравнения, которые отражают в известной мере влияние различий цветового зрения наблюдателей. Эти индивидуальные вариации градуировочных данных могут иметь самые разнообразные размеры в зависимости от степени метамеризма в обоих колориметрических полях при измерениях четвертого цвета.

Условие одинаковости координат четвертого цвета для всех наблюдателей, характерное для этих способов градуировки, соблюдается фак-

тически только для одного данного спектрального состава. При проверочных измерениях других объектов, хотя бы и близких по цвету к этому, четвертому, возможным является как расширение, так и уменьшение индивидуальных расхождений в зависимости от наблюдателя и от сочетания спектральных составов в обоих полуполях.

Соответственно не является обязательным взаимное сближение расчетных данных и результатов колориметрических измерений, которого, казалось, можно было ожидать от этих способов градуировки.

В проверочных испытаниях Н. И. Сперанской и Н. В. Лобановой был применен для осуществления четвертой цветности также стеклянный светофильтр СС-2 с источником «А» с целью уменьшения метамерности в обоих полуполях и соответственного сближения градуировочных уравнений наблюдателей. Это иллюстрируется табл. 1, где приведены трехцветные координаты основных цветов колориметра, полученные девятью наблюдателями при градуировках этого прибора, и введены множители, уравнивающие значения координаты для R у всех девяти наблюдателей.

Таблица 1

Наблюдатель	Основной цвет								
	красный			зеленый			синий		
	x'_R	y'_R	z'_R	x'_G	y'_G	z'_G	x'_B	y'_B	z'_B
1	0,712	0,288	—	0,334	0,701	0,057	0,173	0,150	0,847
2	0,712	0,288	—	0,327	0,686	0,056	0,176	0,152	0,862
3	0,712	0,288	—	0,322	0,676	0,055	0,176	0,152	0,862
4	0,712	0,288	—	0,322	0,676	0,055	0,176	0,152	0,862
5	0,712	0,288	—	0,307	0,644	0,052	0,169	0,146	0,825
6	0,712	0,288	—	0,318	0,666	0,054	0,175	0,151	0,854
7	0,712	0,288	—	0,329	0,690	0,056	0,179	0,155	0,876
8	0,712	0,288	—	0,304	0,637	0,052	0,169	0,146	0,825
9	0,712	0,288	—	0,311	0,652	0,053	0,172	0,148	0,840
Среднее...	0,712	0,288	—	0,319	0,670	0,055	0,174	0,150	0,850
Среднее Δ .	—	—	—	0,008	0,019	0,001	0,003	0,002	0,014

Средние отклонения для G и B значительно меньше тех 4%, которые допустил предположительно Вышецкий [1] в своем отчете и которые повлияли лишь незначительным образом на результаты.

Таким образом, применение светофильтра СС-2 с источником «А» для данной задачи испытания функций сложения является оправданным. Все же для сравнения применялись и способ четырех цветностей с источником «А», и способ Лобановой в двух вариантах: с источником «А» в качестве четвертой цветности и со светофильтром СС-2 при источнике «А».

В последнем случае, ввиду близости полученных наблюдателями данных, они усреднялись, и таким образом применялась одна единая градуировка.

В случае градуировки по четырем цветностям и по способу Лобановой с источником «А» применялись индивидуальные градуировки.

В табл. 2 приводятся расчетные значения x_i , y_i координат цветности проверочных светофильтров и отступления Δx_i , Δy_i от этих расчетных данных результатов колориметрических измерений, усредненных для девяти наблюдателей.

Таблица 2

Светофильтры	Расчетные значения		Градировка по четырем цветностям		Градировка по способу Лобановой с источником «А»		Средняя градировка со светофильтром СС-2	
	x_i	y_i	Δx_i	Δy_i	Δx_i	Δy_i	Δx_i	Δy_i
„А“ (2854°К)	0,451	0,406	—	—	—	—	+0,001	+0,002
ПС-5	0,475	0,390	0,000	+0,001	0,000	+0,002	+0,001	+0,003
RG-6	0,592	0,333	+0,002	+0,003	+0,004	+0,003	+0,005	+0,004
СС-2	0,326	0,336	-0,002	-0,002	-0,002	-0,004	—	—
СЗС-8	0,245	0,390	+0,003	-0,005	-0,004	-0,006	-0,002	0,000
СЗС-2	0,350	0,418	0,000	-0,003	-0,004	-0,003	-0,002	+0,001
ЖЗС-4	0,505	0,457	0,000	+0,003	-0,001	+0,004	-0,003	+0,005
СС-14	0,176	0,150	-0,005	+0,006	-0,004	-0,005	-0,004	-0,005
ПС-3	0,380	0,245	-0,010	-0,001	-0,005	-0,004	-0,002	-0,002
$\Sigma \Delta $			0,022	0,024	0,024	0,031	0,020	0,022

Из этой таблицы видно, что все примененные варианты градуировок дают малоразнящиеся результаты.

В табл. 3 наряду с расчетными данными собраны результаты измерений, выполненных каждым наблюдателем для всех светофильтров с применением СС-2 при источнике «А».

Если представить эти результаты графически, то можно увидеть, что в четырех случаях (светофильтры ПС-5, СЗС-8, СЗС-2, ПС-3) расчетная точка будет находиться внутри области разброса, в двух случаях («А» и ЖЗС-4) она окажется на самом краю и только в двух случаях (СС-14 и RG-6) выйдет за пределы области разброса.

Этот итог можно рассматривать как положительный, говорящий в пользу применимости новых функций сложения. Вообще же при оценке результатов испытаний функций сложения необходимо прийти к соглашению о пределах значимости расхождений между расчетными и экспериментальными данными.

То обстоятельство, что ни в одном из двух отчетов Вышецкого [1] за 1959 г. не приводится данных, усредненных для его десяти наблюдателей, не позволяет сравнить непосредственно значения Δx_i и Δy_i в табл. 2 с результатами испытаний Вышецкого.

Можно только косвенно прийти к заключению, что несмотря на единую градуировку, применявшуюся Вышецким (по способу NPL), отклонения (Δx_i , Δy_i) у его наблюдателей в большинстве случаев существенно больше, чем значения в табл. 2 и 3.

Проведенные Н. И. Сперанской в 1958 г. предварительные испытания на двенадцати светофильтрах при участии четырех наблюдателей дали также результаты, которые можно рассматривать как некоторое, хотя и не прямое указание в пользу новых функций сложения.

Таблица 3

Свето- фильтры	Координаты цветности	Наблюдения									Средние значения	Расчетные значения
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
А* (2851°K)	x	0,454	0,454	0,445	0,450	0,456	0,453	0,444	0,458	0,454	0,452	0,451
	y	0,408	0,409	0,410	0,407	0,406	0,410	0,409	0,408	0,409	0,408	0,406
ПС-5	x	0,480	0,476	0,471	0,477	0,480	0,478	0,465	0,483	0,478	0,476	0,475
	y	0,397	0,393	0,392	0,393	0,388	0,392	0,392	0,394	0,394	0,393	0,390
RG-6	x	0,602	0,596	0,591	0,599	0,600	0,600	0,585	0,598	0,599	0,597	0,592
	y	0,333	0,333	0,335	0,332	0,333	0,335	0,334	0,335	0,332	0,334	0,333
СС-2	x	0,328	0,327	0,324	0,328	0,328	0,325	0,324	0,328	0,325	0,326	0,326
	y	0,336	0,331	0,338	0,336	0,336	0,338	0,338	0,335	0,337	0,336	0,336
СЗС-8	x	0,239	0,244	0,242	0,245	0,240	0,243	0,247	0,243	0,245	0,243	0,245
	y	0,392	0,385	0,395	0,383	0,394	0,390	0,390	0,387	0,391	0,390	0,390
СЗС-2	x	0,351	0,348	0,344	0,349	0,352	0,348	0,343	0,350	0,349	0,348	0,350
	y	0,417	0,414	0,423	0,420	0,418	0,422	0,425	0,417	0,420	0,419	0,418
ЖЗС-4	x	0,505	0,502	0,498	0,501	0,506	0,502	0,498	0,505	0,502	0,502	0,505
	y	0,460	0,464	0,461	0,461	0,457	0,461	0,475	0,458	0,461	0,462	0,457
СС-14	x	0,170	0,172	0,173	0,170	0,170	—	0,174	0,172	0,172	0,172	0,176
	y	0,144	0,153	0,138	0,141	0,144	—	0,162	0,140	0,141	0,145	0,150
ПС-3	x	0,383	0,387	0,378	0,373	0,376	—	0,373	0,381	0,377	0,378	0,380
	y	0,248	0,250	0,240	0,239	0,234	—	0,245	0,244	0,243	0,243	0,245

Действительно сумма расхождений с расчетными данными для координат цветности, т. е. $\Sigma (\Delta r_i + \Delta g_i)$, получилась равной 0,145 в системе основных цветов: 645,2; 526,3; 444,4 для функций сложения Сперанской, найденных ею для восемнадцати наблюдателей. В то же время применение функций Стайлса-Бэрча (пятьдесят наблюдателей) дало 0,121, а для функций сложения Международной комиссии по освещению 1931 г. получилось 0,172.

В связи с данной задачей были рассмотрены результаты, полученные Е. Н. Юстовой на разработанном ею прецизионном колориметре. Ею был обнаружен систематический ход в направлении уменьшения расхождений между измеренными и расчетными данными, по мере того как все более прозрачные красные светофильтры применялись для осуществления основного красного цвета. Это можно связать с тем, что соответственные светофильтры могли измеряться во все более выгодных условиях для точности последующих цветовых расчетов. Это можно рассматривать как существенный момент, который может заметно влиять на исход испытаний и должен быть учтен в дальнейшем.

Бюро колориметрической комиссии сочло целесообразным направить сообщение об имеющихся результатах председателю комитета экспертов по колориметрии Д. Джакду (США).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wyszecki G., First N. R. C. (National Research Council), Report Ottawa, Canada, 1959.
2. Stiles W. S. und Wyszecki G., Second N. R. C., Report Ottawa, Canada, 1959.
3. Лобанова Н. В., «Светотехника», № 4, 1955, стр. 7.

Поступила в редакцию
20/III 1961 г.

В. А. КОРНДОРФ, И. А. ЧЕРНЫЙ

ВНИИМ

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ЧЕРНО-БЕЛЫХ И ЦВЕТНЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АПЕРТУРЫ ОБЪЕКТИВА

В статье приведена зависимость разрешающей способности различных фотографических материалов от величины апертуры объектива резольвометра в пределах 0,07—0,30. У мелкозернистых черно-белых светочувствительных слоев эта зависимость выражена вполне ясно; у крупнозернистых и цветных слоев подобная зависимость отсутствует. Показан способ повышения разрешающей способности некоторых черно-белых слоев посредством прокрашивания их желтым красителем.

Разрешающая способность фотографического материала, т. е. его способность отдельно передавать мельчайшие детали оптического изображения, является одним из важнейших свойств светочувствительных слоев и существенным в различных случаях научного и технического применения фотографического процесса. Согласно ГОСТ 2819—45 [1] разрешающая способность выражается максимальным числом отдельно передаваемых фотографическим слоем параллельных штрихов, приходящихся на 1 мм оптического изображения, при одинаковой ширине штрихов и промежутков между ними. В том же ГОСТ рекомендованы проекционный метод измерений разрешающей способности и резольвометр ГОИ определенного типа с апертурой 0,11 для проведения этих испытаний.

Стандартизация метода измерений и измерительной аппаратуры означала в свое время существенный шаг вперед в оценке качества фотографических материалов и до сих пор определяет преимущественное положение в состоянии этого вопроса в СССР. Никаких иностранных стандартов на приборы и методы определения разрешающей способности до сих пор не имеется, хотя эти вопросы и поднимались в литературе [2]; сведений о применявшихся приборах и методах измерений в большинстве случаев не приводится, поэтому опубликованные зарубежные данные о разрешающей способности различных фотографических материалов обычно являются малосопоставимыми.

Однако существующий ГОСТ 2819—45, разработанный больше 15 лет назад, также нуждается в переработке. Установленные в нем рекомендации дают возможность измерять разрешающую способность светочувствительных слоев только до 300 мм^{-1} в соответствии с апертурой объектива предложенного резольвометра. Между тем, за последние годы

появилось большое количество светочувствительных материалов с разрешающей способностью в несколько сотен линий на миллиметр; соответственно повысились требования к оценке этой величины; для удовлетворения повышенных запросов разработаны новые модели резольвометров с апертурой объектива 0,30* [3]. С другой стороны, одновременно с последними моделями в стране применяются резольвометры, разработанные около 25 лет назад [4—6]. Применение на практике различных приборов с апертурами 0,11; 0,20 и 0,30 приводит к некоторому нарушению единообразия резольвометрических испытаний.

В связи с этим во ВНИИМ в 1956—1957 гг. была создана образцовая резольвометрическая установка [7] и разработан метод проверки промышленных резольвометров.

Резольвометр ВНИИМ является улучшенным образцом резольвометра СР-13 [3]; он позволяет производить измерения разрешающей способности различных светочувствительных материалов в пределах $20-1000 \text{ мм}^{-1}$, а прибор СР-13 — до 680 мм^{-1} . Резольвометр СР-13 имеет апертуру объектива 0,30. Объектив прибора ВНИИМ может быть заднафрагмирован до различных значений апертуры: 0,075; 0,10; 0,15; 0,24 и 0,30. Этот прибор был использован в настоящей работе для исследования зависимости разрешающей способности фотографических материалов от апертуры объектива.

Поскольку разрешающая способность фотографических материалов зависит от состава проявителя, времени проявления и количества освещения, действовавшего на светочувствительный слой, были приняты меры для ослабления этих побочных факторов.

В процессе исследования черно-белых фотографических материалов применялся стандартный проявитель № 1 [8], приготовленный в количестве 10 л; для проявления резольвограмм каждый раз из общего объема проявителя отливали свежую порцию в 0,1 л. Температуру проявителя поддерживали равной $20 \pm 0,1^\circ \text{C}$; проявление вели в приборе-автомате типа ФКЦ-9. Проявление цветных фотографических материалов вели аналогичным образом в тех проявителях и при тех условиях, которые приняты для обработки цветных материалов.

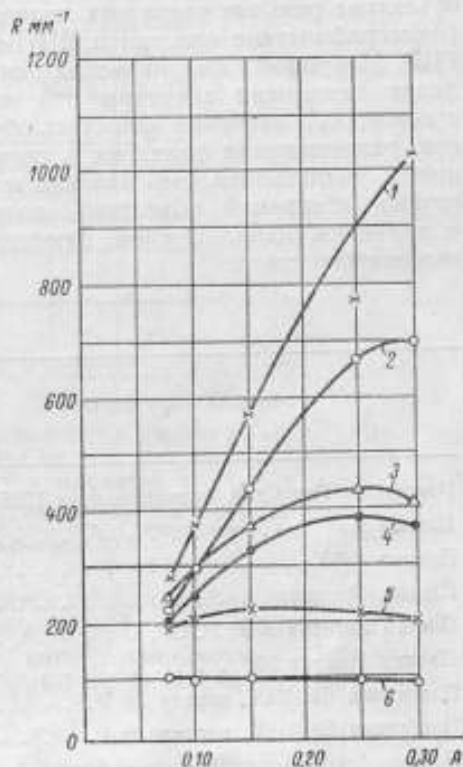


Рис. 1. Зависимость разрешающей способности R фотографических материалов от величины апертуры A объектива резольвометра.

1 — пластинка ВНИИМ; 2 — пластинка Микрофайл; 3 — пластинка Микрофайл; 4 — пленка оптический; 5 — позитив МЗ; 6 — пленка АМ35.

* Ащеулов А. Т., Левин Б. М., Павличук Т. А., Проекционный резольвометр. (Описание). Л., 1952.

Количество освещения при всех испытаниях сохранялось постоянным путем изменения времени освещения при изменении апертуры объектива. Полученные резольвограммы рассматривали в микроскоп при надлежащем увеличении.

Результаты исследований ряда черно-белых фотографических материалов различной зернистости, контрастности и чувствительности приведены в табл. 1 и на рис. 1. В соответствии с данными других исследователей получена зависимость разрешающей способности от апертуры объектива резольвометра для мелкозернистых светочувствительных слоев объектива резольвометра для мелкозернистых светочувствительных слоев (фотографические пластинки ВНИИМ*, Микрат Фейнкорн фирмы Агфа ГДР, Микрофайл американской фирмы Дюпон и др.). В известных пределах изменения апертуры эта зависимость почти линейна. Начиная с некоторого значения апертуры объектива, различного для разных пленок, разрешающая способность светочувствительных слоев имеет тенденцию к уменьшению. Это явление может быть объяснено влиянием остаточных aberrаций объектива, возрастающих с увеличением апертуры, и влиянием толщины слоя, дающего при увеличении апертуры больше рассеянного света.

Таблица 1

Фотографический материал	Разрешающая способность, л.мм ⁻¹				
	апертура объектива резольвометра				
	0,075	0,10	0,15	0,24	0,30
Пластинки Ред Стар, отечественные 1925—1930 гг.	61	67	67	67	67
Пленка АЗ5	98	88	88	98	107
Пленка АМ35	107	98	107	107	107
Пленка Опытная	197	232	329	301	391
Пленка позитив МЗ	191	210	231	231	231
Пленка Микрат 200	131	157	157	157	191
Пластинки ВНИИМ, партия № 2	282	376	563	783	1030
Пластинки ВНИИМ, партия № 1	250	344	501	657	751
Пленка Агеле Документфильм, фирма Агфа ГДР	143	174	210	210	210
Пластинки Микрат Рапид, фирма Агфа ГДР	143	157	174	231	231
Пластинки Микрат Фейнкорн, фирма Агфа ГДР	219	294	438	657	689
Пленка Микрофайл, американская фирма Дюпон	250	294	375	438	467
Пленка Микрокопи, американская фирма Дюпон	191	251	307	307	307

Разрешающая способность крупнозернистых материалов зависит от апертуры объектива в значительно меньшей степени (пленка АМ35, позитив МЗ).

Попутно с проведенными исследованиями были выполнены опыты с прокрашиванием пленок типа АМ35 и позитивной МЗ в водном растворе тартрацина. Концентрация красителя составляла 3 г на 1000 мл воды, время погружения пленки — 5 мин. При этом установлено общее повышение разрешающей способности исследованных пленок на 77 и 45% (рис. 2 и табл. 2). Указанное действие желтого красителя связано с поглощением им фотографически активных лучей внутри слоя,

* См. статью настоящего сборника, стр. 124.

что уменьшает рассеяние света и тем улучшает условия разрешения линий. Увеличение концентрации красителя до 6 г на 1000 мл воды дальнейшего влияния на значение разрешающей способности данных слоев не имеет.

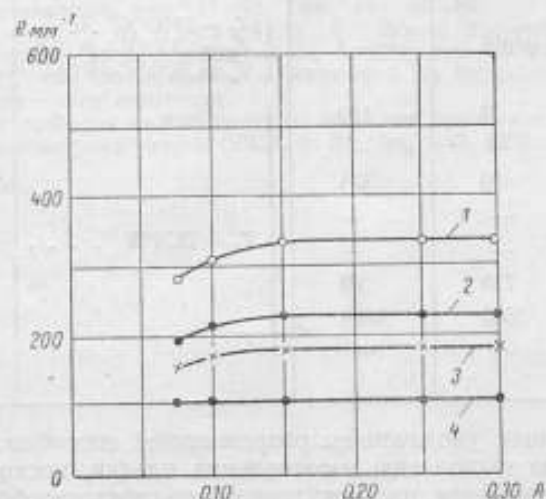


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности R фотографических материалов от величины апертуры A объектива резольвометра.

1 — позитив МЗ, окрашенный тартразином; 2 — то же, неокрашенный; 3 — пленка АМ35, окрашенная тартразином; 4 — то же, неокрашенная.

Резольвометрические испытания цветных фотографических материалов были проведены для ряда образцов новейших типов пленок, полученных от Научно-исследовательского кинофотоинститута, Ленфильма и Кинокопировальной фабрики. Обработку их вели как указано выше.

Таблица 2

Фотографический материал	Разрешающая способность R мм ⁻¹				
	апертура объектива резольвометра				
	0,075	0,10	0,15	0,24	0,30
Пленка типа АМ35, не окрашена	98	107	107	107	107
Пленка типа АМ35, окрашена тартразином	157	174	174	174	191
Пленка-позитив МЗ, не окрашена	191	210	231	231	231
Пленка-позитив МЗ, окрашена тартразином	279	307	337	337	337

Разрешающая способность цветных фотографических материалов, как правило, значительно ниже разрешающей способности черно-белых фотографических материалов и лежит в пределах от 30 до 120 мм⁻¹. Только цветная пленка типа ЦП7 новейшей разработки имеет разрешающую способность 250 мм⁻¹ (табл. 3).

Для повышения разрешающей способности фотослоев в промышленности используются различные способы. В пленках типа ДС применено прокрашивание желтым красителем верхнего синечувствительного слоя.

Таблица 3

Тип пленки	Номер		Источник света в резольво- метре	Разрешающая способ- ность R мм ⁻¹
	оси	эмульсии		
СН2	06028	—	$T_e = 2850^\circ\text{K}$ $T_e = 2850^\circ\text{K} + \text{ЖС18}$ $T_e = 2850^\circ\text{K} + \text{КС14}$	61
				55
				46
ДС2	34	163	$T_e = 2850^\circ\text{K}$	31
ДС3	—	—		67
ЛН3	400	134		42
ДС5	—	—		74
КП4	—	—		118
ЦП2	725	90		55
ЦП3	2655	1004		67
ЦП7	—	—		250

Наряду с заметным увеличением разрешающей способности этот прием упрощает общую технологию изготовления пленки, поскольку при этом исключается применение промежуточного коллоидосеребряного желтого слоя. В пленках ДС5 и ЦП7 в качестве противоореольного слоя применен черный слой вместо обычного зеленого. Черный слой устраняет ореолы отражений, повышая тем самым разрешающую способность материала. Предложен также способ прокрашивания эмульсионных слоев в цвет, дополнительный к зоне чувствительности [9], но пока он имеет лишь ограниченное промышленное применение.

Как показали измерения, разрешающая способность исследованных цветофотографических материалов не зависит от величины апертуры оптической системы резольвометра. Объясняется это, так же как в соответствующих случаях для черно-белых фотографических материалов, низкой величиной разрешающей способности.

Выше было обращено внимание на то, что разрешающая способность мелкозернистых черно-белых фотографических материалов при некоторых определенных значениях апертуры объектива имеет тенденцию к уменьшению своей величины. Для выяснения этого вопроса в лаборатории в настоящее время продолжают исследования по определению разрешающей способности указанных светочувствительных слоев в более широком интервале апертур — 0,07 ÷ 0,65.

Выполненное усовершенствование резольвометра ВНИИМ позволяет использовать три высококачественных объектива с апертурами 0,3; 0,5; 0,65 без нарушения юстировки прибора.

Одновременно изучается влияние толщины светочувствительного слоя на определяемую величину разрешающей способности.

Результаты этих исследований будут опубликованы.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 2819—45, Фотографические материалы на прозрачной подложке, Метод резольвометрического испытания.
- Narath A. und Schimmel G., Zur Normung einer Meßmethode für die Bestimmung des Auflösungsvermögens photographischer Schichten, «Photo-technik und Wirtschaft», Bd. 3, № 11—12, 1952, S. 439—440 и 482—483.
- Ащеулов А. Т., Павличук Т. А., Хухряна М. Д., О зависимости разрешающей способности фотографических материалов от апертуры объектива, «Успехи научной фотографии», т. IV, 1955, стр. 88—105.

4. Бурмистров Ф. Л., Разрешающая способность фотографических слоев, Труды Государственного оптического института, т. X, вып. 90, 1934, стр. 36—63.
5. Бурмистров Ф. Л., Резольвометр ГОИ, «Журнал технической физики», т. VI, вып. 10, 1936, стр. 1731—1739.
6. Бурмистров Ф. Л., Универсальный резольвометр конструкции ГОИ, «Кино-фотохимическая промышленность», вып. 11—12, 1939, стр. 83—86.
7. Коридорф В. А., Черный И. А., Новый проекционный резольвометр, «Оптико-механическая промышленность», № 5, 1959, стр. 16—21.
8. ГОСТ 2817—50, Фотографические материалы на прозрачной подложке, Метод общесенситометрического испытания.
9. Рефераты докладов на совещании по основным проблемам теории и технологии цветофотографических материалов СССР, г. Шостка, май, 1959, стр. 4.

Поступила в редакцию
28/III 1969 г.

В. А. КОРНДОРФ, И. А. ЧЕРНЫЙ

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНКИ ВНИИМ ДЛЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

В статье описана методика изготовления фотографических пластинок с разрешающей способностью свыше 1000 мм^{-1} и коэффициентом контрастности около 5,0. Чувствительность пластинок после сенсibilизации составляет около $200\text{--}300 \cdot 10^{-6}$ ед. ГОСТ.

Наша фотохимическая промышленность выпускает светочувствительные материалы с различной разрешающей способностью. Определение последней производится с помощью промышленных резольвометров. Для поддержания единства этих измерений во ВНИИМ создан образцовый проекционный резольвометр [1], посредством которого, используя фотографический метод, будет выполняться поверка промышленных приборов. Промежуточным звеном при этой поверке должны служить высококонтрастные светочувствительные слои с высоким разрешением — более 600 мм^{-1} . Ввиду отсутствия этих фотоматериалов лаборатория ВНИИМ освоила их изготовление.

Методика, установленная в результате проведенной работы, близка к методике, описанной в одной из работ Национальной физической лаборатории Англии [2]. Создание подобных пластинок является первым отечественным опытом, удавшимся после тщательной разработки технологического процесса. Успех его в большой мере зависит от точного выполнения ряда мелких подробностей и тщательности проведения отдельных операций. Исходя из этого, предполагается, что детальное описание всей методики может представить практический интерес.

Следующие условия являются основными при синтезе эмульсии.

1. В процессе синтеза в водный раствор подогретого желатина добавляют водные растворы азотнокислого серебра и бромистого калия одновременно с одинаковой скоростью и в строго определенном количестве. Концентрация добавляемых растворов должна быть минимальна и приблизительно постоянна в течение всего процесса синтеза эмульсии.

2. В начале синтеза эмульсии в раствор желатина вводят некоторое избыточное количество бромистого калия.

Согласно литературным данным [2], небольшой избыток бромистого калия в процессе образования эмульсии одновременно увеличивает ее чувствительность и зернистость. На рис. 1 приведены заимствованные из указанной статьи кривые, показывающие изменения величин сине-

красного отношения 1, характеризующего зернистость слоя, коэффициент контрастности 2 и светочувствительности 3 фотографического слоя в зависимости от избыточного содержания бромистого калия. Дополнительным экспериментом в настоящей работе установлено, что введение в раствор желатина 0,126 мл раствора бромистого калия концентрации 0,001 моля на 1 л создает оптимальные условия для получения высоко-разрешающих и высококонтрастных светочувствительных слоев.

Полный рецепт состава эмульсии следующий:

- 1) желатина — 5 г на 80 мл дистиллированной воды;
- 2) бромистого калия — водный раствор концентрации 0,001 моля на 1 л — 0,126 мл;
- 3) азотнокислого серебра — 1 г на 10 мл воды — 10 мл;
- 4) бромистого калия — 0,75 г на 10 мл воды — 10 мл;
- 5) хромовых квасцов — 1 мл;
- 6) спирта-ректификата — 1 мл;
- 7) стабилизатора М-42 — 0,2 мл.

Как показал опыт работы, очень существенно приготовить растворы азотнокислого серебра и бромистого калия точно требуемой концентрации. Взвешивание навесок данных реактивов произведено с точностью 0,1 мг; затем их растворяли в дистиллированной воде при $t = 20^\circ\text{C}$ и растворы доводили до объема 1 л. Объемы колб для каждого раствора предварительно были проверены.

Синтез эмульсии производили в следующей последовательности. В стакан с раствором желатина, подогретым до 60°C , приливали 0,126 мл раствора бромистого калия. Эта температура поддерживалась в течение всего синтеза. Одновременно раствор перемешивался с помощью стеклянной мешалки, вращающейся от мотора. Скорость вращения мешалки регулировали таким образом, чтобы устранить образование большого количества пены.

В раствор желатина, при непрерывном его перемешивании, приливали растворы азотнокислого серебра и бромистого калия со скоростью, примерно, 2 капли в 1 сек. Весьма существенным, как уже отмечалось, является точное соблюдение одинаковой скорости вытекания обоих реагентов на всем протяжении приливания их к раствору желатина. Чтобы обеспечить соблюдение этого условия, предварительно были отобраны две стеклянные бюретки с подсоединенными к ним через резиновые трубки капиллярами. Бюретки с капиллярами были прокальброваны на одинаковую скорость вытекания растворов; одновременность вытекания 10 мл раствора из каждой бюретки была достигнута подбором длины капиллярных трубок. Для удобства работы бюретки с капиллярами были закреплены на отдельном штативе.

По окончании приливания растворов азотнокислого серебра и бромистого калия в эмульсию добавляли указанные в рецепте количества

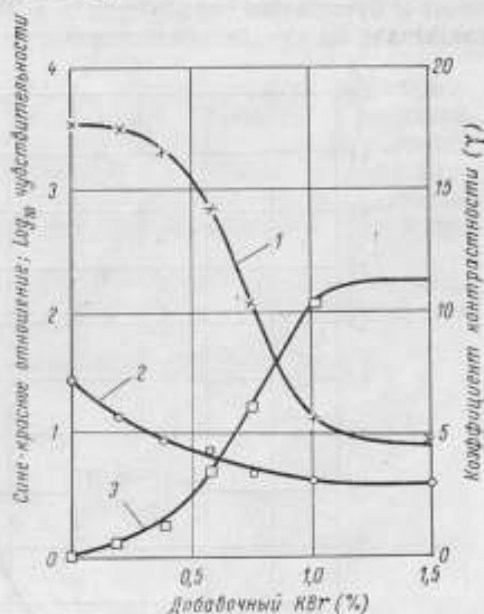


Рис. 1.

спирта, хромовых квасцов и стабилизатора. Спирт добавляют для уменьшения образования пены в эмульсии, хромовые квасцы повышают прочность желатина, а стабилизатор устраняет появление желтой вуали при последующей обработке пластинок.

Стеклопластиковые пластины, которые предназначались для полива эмульсией, были предварительно тщательно вымыты, выкупаны в растворе, содержащем 0,5% желатина и 0,05% хромовых квасцов, и затем высушены в сушильном шкафу при $t = 25^\circ \text{C}$. Просушенные пластины раскладывали на стекле нивелировочного столика.

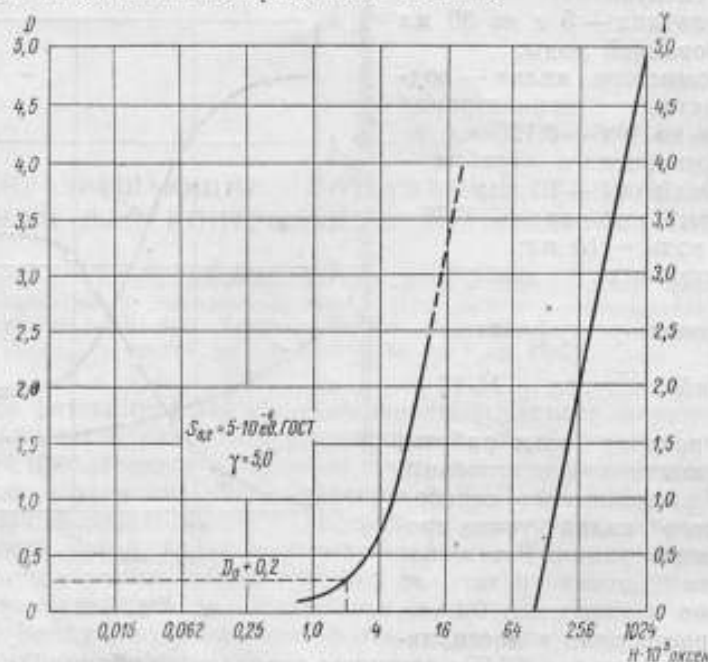


Рис. 2.

Полив эмульсии вели сразу же после окончания синтеза из расчета 2—3 мл эмульсии на пластинку размером 9×12 см. Застывание эмульсии на пластинках происходит в течение нескольких минут, причем в это время стекло нивелировочного столика с обратной стороны охлаждается льдом. Сразу после застывания производится промывка пластинок в проточной воде для удаления продуктов двойного обмена (азотнокислого калия). Время промывки — 30 мин; последующая сушка производится в сушильном шкафу при $t = 25^\circ \text{C}$.

На данной стадии изготовления несенсибилизированные пластины имеют малую чувствительность — около $5 \cdot 10^{-6}$ ед. ГОСТ и высокую контрастность — около 5,0. На рис. 2 приведена в качестве образца характеристическая кривая для одной из партий таких пластинок, изготовленных во ВНИИМ. Фотопластинки экспонировали в сенситометре типа ФСР-41 с лампой накаливания $T_c = 2850^\circ \text{K}$. Количество освещения на одиннадцатом поле сенситограммы соответствовало 70 880 аксек. Проявление вели в стандартном проявителе № 1 при температуре 20°C в течение 8 мин. Чувствительность фотографических пластинок определялась по формуле

$$S_{0.2} = \left(\frac{1}{H} \right)_{D=0.2 + D_s}$$

Повышение чувствительности изготовленных пластинок достигалось их последующей обработкой сенсibilизирующим раствором следующего состава: спирта-ректификата — 50 мл; воды дистиллированной — 50 мл; сенсibilизатора № 680 с концентрацией 0,1% — 3 мл.

Купание несенсibilизированных пластинок в течение 3 мин повышает их чувствительность в 10—15 раз. Последующая промывка фотографических пластинок в проточной воде в течение 15 мин дополнительно повышает их чувствительность примерно в 4 раза. Общая светочувствительность сенсibilизированных и промытых пластинок увеличивается таким образом в 40—60 раз.

Пластины ВНИИМ были исследованы в отношении их разрешающей способности на образцовом резольвOMETре ВНИИМ.* Сравнение с другими исследованными образцами фотографических слоев различного происхождения, в том числе и с зарубежными пластинками и пленками, показывает, что фотографические пластины ВНИИМ имеют наименьшую зернистость и наибольшую разрешающую способность: при апертуре 0,30 она превышает 1000 м.м⁻¹.

Полученный результат дает возможность рекомендовать пластины ВНИИМ для различного рода исследовательских работ, а также для контрольно-измерительных целей.

В работе принимала участие техник лаборатории Н. В. Колбе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корндорф В. А., Черный И. А., Новый проекционный резольвOMETр. «Оптико-механическая промышленность», № 5, 1959, стр. 16—21.
2. Grawford V. H., The preparation of ultra-fine grain photographic emulsions, «Journ. of Scientific Instruments», v. 31, № 9, 1954, p. 333—335.

Поступила в редакцию
28/XII 1959 г.

* См. статью настоящего сборника, стр. 118.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Н. Р. Батарчукова, А. И. Карташев, А. П. Кириченко, Метод получения когерентного излучения при условии резонансного поглощения	5
Ю. И. Трулев, Регистрация ахроматической полосы интерференционной картины в белом свете	11
Н. Р. Батарчукова, Ю. П. Ефремов, Применение фотоэлектрической регистрации интерференционных колец равного наклона при измерениях длины и длины волны	15
Е. А. Волкова, Полиметрические кварцевые пластинки	27
В. Е. Карташевская, Опытное определение светового эквивалента лучистой мощности	36
В. Е. Карташевская, Об одном способе измерений лучистой мощности в пучке малого сечения	47
Т. Н. Андреева, В. Е. Карташевская, С. П. Скачкова, Установка для проверки селеновых люкметров	59
Е. Н. Юстова, Визуальный колориметр ВНИИМ	66
Е. Н. Юстова, Новые таблицы для испытания цветного зрения	89
И. С. Громова, Е. Н. Юстова, Опыт создания стеклянной шкалы канифоли	106
Г. Н. Раутман, Испытания новых функции сложения цветов	113
В. А. Коридорф, И. А. Черный, Разрешающая способность некоторых черно-белых и цветных фотографических материалов в зависимости от апертуры объектива	118
В. А. Коридорф, И. А. Черный, Высокоразрешающие фотографические пластинки ВНИИМ для контрольно-измерительных целей	124

Главный редактор *Н. Н. Александрова*

Техред *Р. Г. Польская*

Корректоры *М. А. Беляева, Л. Н. Кири*

Подписано к печати 24/X 1961 г.

Уч.-изд. л. 11

Формат бумаги 70×108¹/₁₆

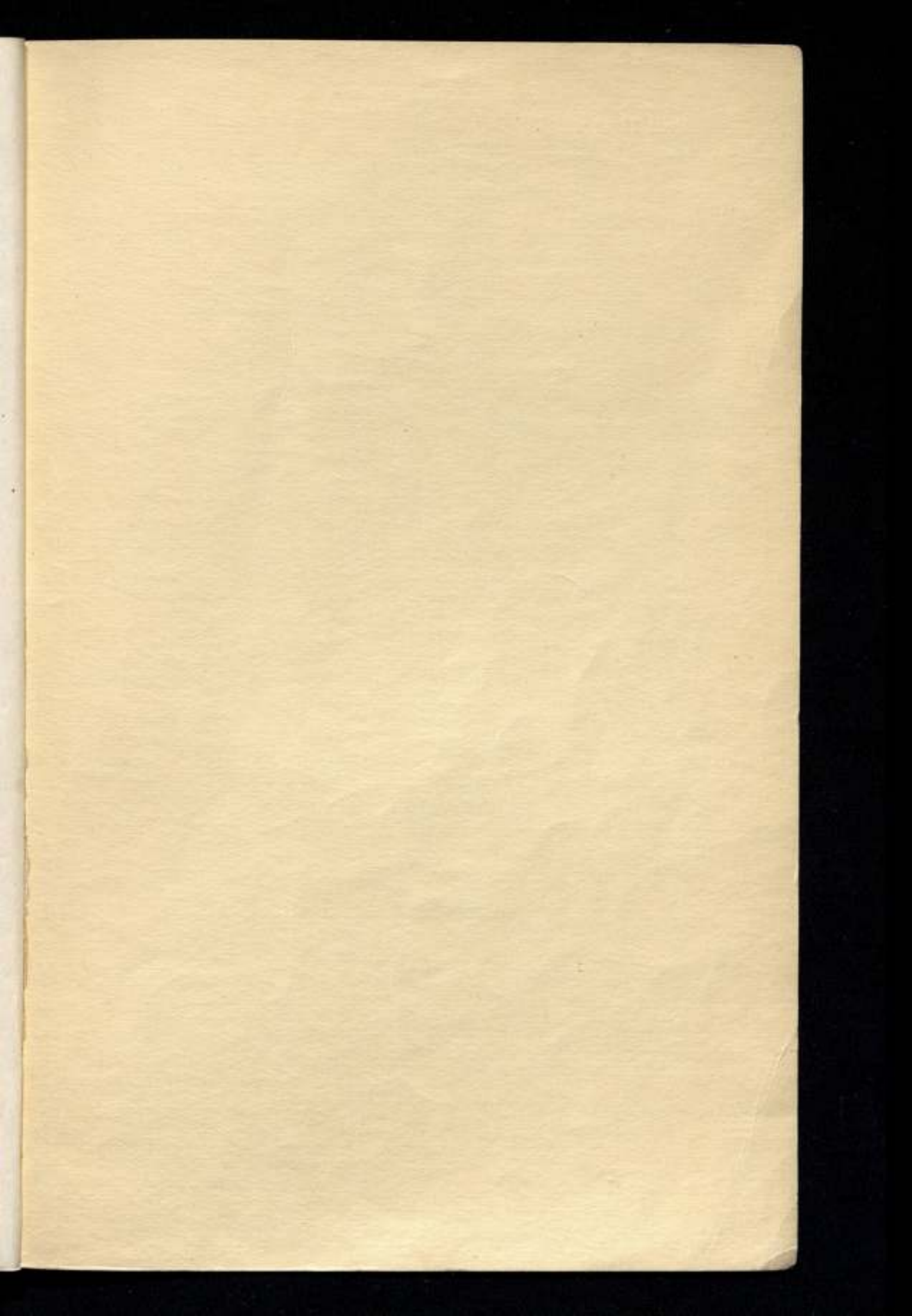
Печ. л. 8

М-71539

Тираж 3000

Заказ 763

Картфабрика ВМФ



Цена 77 коп.