

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

---

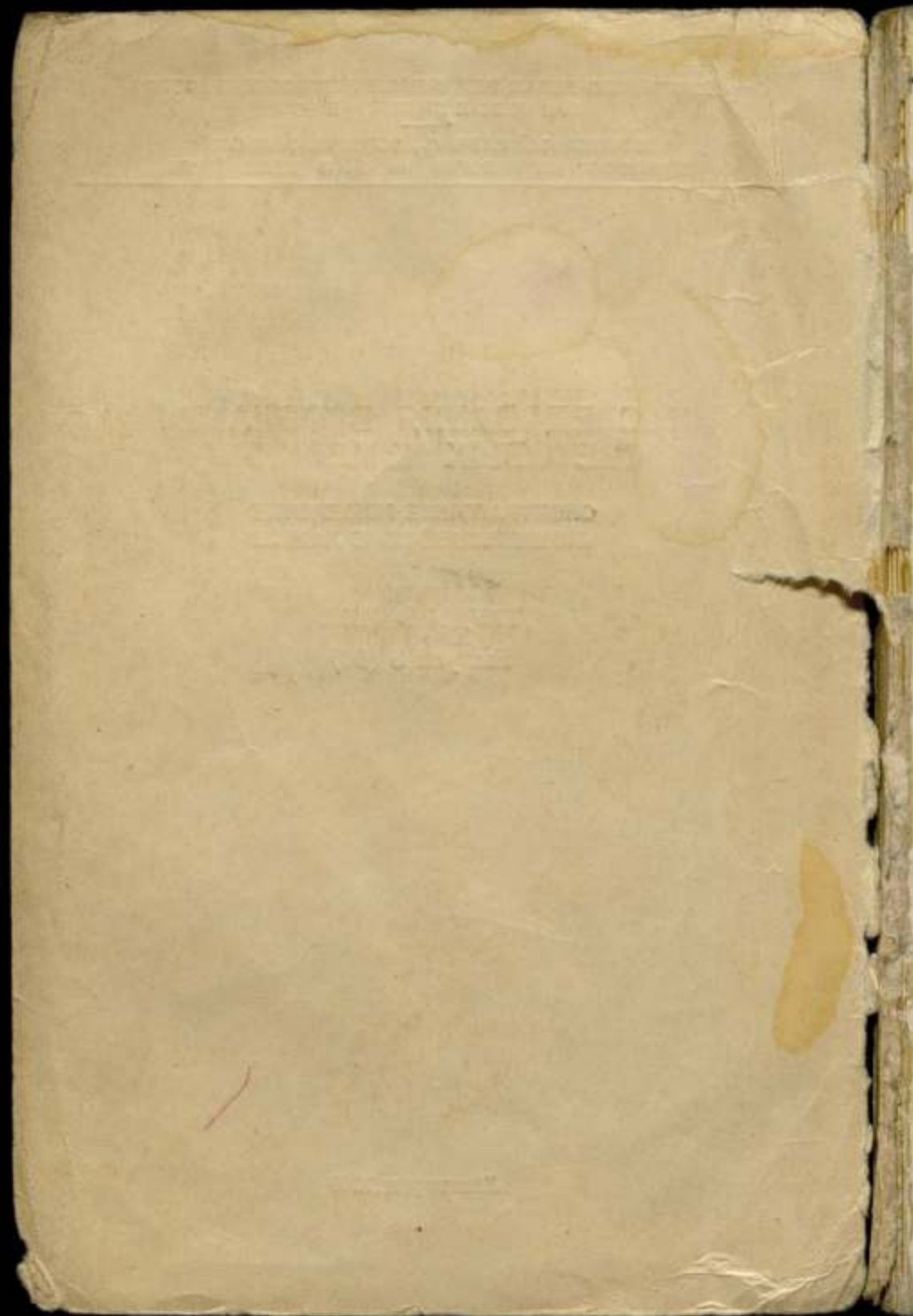
## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 8 (68)

Ленинград 1949



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 8 (68)

Под редакцией проф. П. М. Тиходеева

м 10356



Ленинград 1949

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DIVISION OF THE PHYSICAL SCIENCES  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5708 SOUTH CAMPUS DRIVE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637

JOHN J. HARRIS  
PHYSICIST

1958

RECEIVED  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
UNIVERSITY OF CHICAGO  
MAY 15 1958

1958

В. Е. КАРТАШЕВСКАЯ

## ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВОЙ ЛАМПЫ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ МОЩНОСТИ В ОБЛАСТИ ВИДИМОГО СПЕКТРА

### 1. О ПОНЯТИИ „ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА“ И О СПОСОБАХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для нужд науки и техники излучение многих источников света надо оценивать не только с помощью обычных световых величин, но еще и по спектральному составу. Именно для этой последней цели — определения спектральной характеристики излучения — служит понятие цветовой температуры. Происхождение этого выражения обусловлено — для случая теплового излучения — связью между спектральным составом излучения (а следовательно и его цветом) и температурой источника.

Для идеального случая полного излучателя — абсолютно черного тела — эта связь имеет вполне строгое и точное выражение. Каждому действительному значению температуры черного тела соответствует вполне определенное значение общей мощности лучистой энергии и определенный спектральный состав ее. Характер распределения лучистой мощности в области видимого спектра определяет также вполне однозначно цвет излучения от черного тела.

Для реальных тел в природе не существует точных зависимостей подобного рода. Напротив, многочисленные работы по исследованию излучательных свойств различных веществ, в частности и металлов, показали невозможность установления для них точных закономерностей по причине непостоянства коэффициентов излучения как по спектру, так и при изменении температуры. Существующие весьма сложные зависимости еще более усложняются в применяемых на практике электрических источниках света в виде ламп накаливания. На спектр последних добавочно влияют колба лампы, налет на стекле от распыления металлической нити, свивание нити в спираль и т. д.

Для оценки излучения реального источника оказывается удобным сравнивать его с излучением черного тела, используя при этом то сходство, которое существует в распределении мощности у обоих. Известно, что ряд металлов, в частности воль-

фрам, обнаруживает в характере излучения в области видимого спектра значительное подобие с черным телом. Соответственно этому, при сравнении двух излучений устанавливается та температура черного тела, при которой излучение последнего наиболее близко подходит к излучению исследуемого источника. Эта температура и носит название цветовой температуры, и приобрела в настоящее время значение общепринятой простой характеристики излучения в указанной спектральной области.

Определять цветовую температуру возможно, уравнивая<sup>1</sup> цвет излучения (отсюда и само название цветовой температуры); возможно искать равное<sup>1</sup> распределение лучистой мощности или по всей области видимого спектра или в отдельных его участках. Из этих трех определений самого понятия вытекают и основные методы измерения цветовой температуры.

В силу установившегося обыкновения на практике все три определения считаются более или менее равноправными. Но это не так, если говорить о точности измерений. Здесь, помимо погрешностей, внесенных самой обстановкой опыта, особенно существенным оказывается допущенное в определении самого понятия цветовой температуры предположение равенства (по какому-либо признаку) данного излучения с излучением черного тела. Фактическое отступление от этого предположения в конечном итоге измерений выявится как некоторая дополнительная погрешность. Именно в силу этого обстоятельства результаты различных способов измерения цветовой температуры оказываются не вполне одинаковыми.

Несогласованность отдельных определений ограничивает область применения самого понятия цветовой температуры. О последней возможно говорить лишь для источников со сплошным спектром излучения без резко выраженных избирательных свойств в видимой области.

На практике до сих пор наиболее широко применялся способ уравнивания цвета излучения. Он наиболее прост в отношении необходимой аппаратуры и отличается быстротой и легкостью как измерений, так и их обработки. Существующие в различных странах шкалы цветových температур созданы именно с помощью этого метода.

Способ измерения относительного распределения мощности в спектре, напротив, отличается большими экспериментальными трудностями, требует высококачественной и редкой аппаратуры и по точности до сих пор считался ниже предыдущего метода. Однако существенно то, что точность энергетических измерений может повышаться и неизменно повышается по мере разработки и усовершенствования необходимой аппаратуры и техники измерений.

Напротив, относительная точность способа уравнивания цвета, хотя вполне достаточная для многих случаев практики, имеет естественный и непреходимый предел в виде физиологических

<sup>1</sup> С черным телом.

свойств глаза. В различных случаях измерений она оказывается ограниченной по следующим двум основаниям:

- 1) при одинаковом спектральном составе излучений — в силу пороговой чувствительности глаза к различению цвета;
- 2) при неодинаковом распределении мощности по спектру у сравниваемых источников — вследствие различия в индивидуальных свойствах глаз наблюдателей при восприятии цветов.

С другой стороны, ограничение в применении понятия цветовой температуры, связанное с отступлением излучения вольфрама (или другого тела накала) от излучения черного тела, имеет решающее значение именно в способе подбора цвета. Заключение о спектре источника делается здесь исключительно по цвету его излучения и поэтому с заведомой погрешностью. Между тем, непосредственно измерив распределение мощности в спектре, не обязательно отождествлять его с каким-либо излучением черного тела. Вместо этого возможно указать количественные отклонения в излучении данного источника от наиболее близкого к нему (при некоторой температуре) излучения черного тела. Точность такого сопоставления не ограничена какими-либо предварительными допущениями, а только погрешностью самих измерений. С другой стороны, расчет цвета для известного распределения энергии не представляет затруднений. Кроме того, определение относительной мощности при соответствующем уровне измерительной техники возможно расширить за пределы видимого спектра.

Таким образом, оценка состава излучения по распределению мощности в спектре имеет более широкие возможности и принципиально более полна и совершенна, чем оценка по его цвету.

Ближайшей задачей фотометрии в связи с этим явилось установление образцовых источников распределения лучистой мощности. В качестве первого условия для этого необходимо было обеспечить достаточную точность в выполнении энергетических измерений.

Отсюда вытекают следующие задачи, поставленные на разрешение в настоящей работе:

- 1) исследование метода измерений относительного распределения мощности в спектре;
- 2) определение и возможный учет причин, влияющих на точность измерений;
- 3) получение образцовой лампы с известным относительным распределением мощности с точностью, предельной для имевшихся обстановки и оборудования.

В основу работы положен экспериментальный метод исследования.

Сущность способа измерения распределения мощности в спектре сводится к следующему. Неселективный приемник лучистой энергии — болометр или термопара, — включенный на чувствительный гальванометр, располагается в окулярной щели спектрального прибора. Относительные значения измеренных термотоков дают, после введения надлежащих поправок на дисперсию и пропускание прибора, распределение мощности у исследуемого источника.

Выполнение этих конечных измерений и расчетов требует предварительного исследования основных частей измерительной установки: спектрального прибора и приемников лучистой мощности. Эти дополнительные исследования, играющие вспомогательную роль, составляют значительную часть объема работы и в большой мере осложняют применение самого метода.

## II. СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПРИБОР И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ

### 1. Особенности спектральных измерений

Характерной особенностью всех измерений в монохроматическом свете являются большие потери энергии как вследствие выделения лишь малой доли общего излучения, так и дальнейшего ослабления этой доли за счет значительного поглощения ее в приборе. С большими потерями энергии связаны основные трудности спектральных измерений: малая мощность (в особенности в коротковолновой части спектра) и большое влияние рассеянного света.

Рассеянный свет присутствует приблизительно в равном количестве по всему спектру, но в измеренном значении лучистой мощности, выходящей из окулярной щели, составляет большую или меньшую долю. Величина этой последней зависит от абсолютного значения энергии в выделенном спектральном промежутке и соотношения чувствительностей приемника к излучению основной длины волны и пропущенной случайно.

Чернение стенок и система поперечных оградительных диафрагм внутри труб, полировка и чистка оптических частей, снижая количество рассеянного света, не устраняют его полностью в обычном монохроматоре. Также лишь частично его вредное влияние может быть устранено применением цветных фильтров или подбором приемников с определенным видом кривой спектральной чувствительности. Наиболее действенным способом для устранения рассеянного света является двойная монохроматизация.

### 2. Двойные монохроматоры, примененные в настоящей работе

Во время выполнения настоящей работы Фотометрическая лаборатория не располагала готовыми двойными монохроматорами. Взамен было собрано, путем механического сочленения однократных спектральных приборов, два сдвоенных монохроматора. Оба они составлены по типу двойной<sup>1</sup> (суммарной) дисперсии, что определилось расположением призм в имевшихся приборах. В дальнейшем эти двойные монохроматоры обозначаются № 1 и 2.

Двойной монохроматор № 1 (рис. 1) составлен из двух вполне одинаковых спектрометров. Это — приборы постоянного отклоне-

<sup>1</sup> Длина спектра в плоскости окулярной щели превышает длину его в плоскости средней щели и два раза при полном единообразии обеих половин прибора.



ния. Преломляющий угол равен  $60^\circ$ ; фокусные расстояния обоих коллиматоров и телескопов равны 260 мм; диаметры всех четырех линз — 35 мм. Оба прибора были жестко связаны между собою массивной металлической скрепкой и неподвижно прикреплены к столу. Входная щель второго прибора, т. е. средняя щель системы, находится в фокусе выходной линзы первого монохроматора. Телескоп первого и коллиматор второго монохроматора установлены так, что их оптические оси совпадают. Все три щели были центрированы друг относительно друга по всей длине спектра.

Двойной монохроматор № 2 (рис. 2) собран из двух неоднородных приборов: 1) монохроматора постоянного отклонения (длины коллиматора и телескопа — 290 мм, диаметры линз — 35 мм, преломляющий угол призмы —  $60^\circ$ ) и 2) спектропиromетра (длины

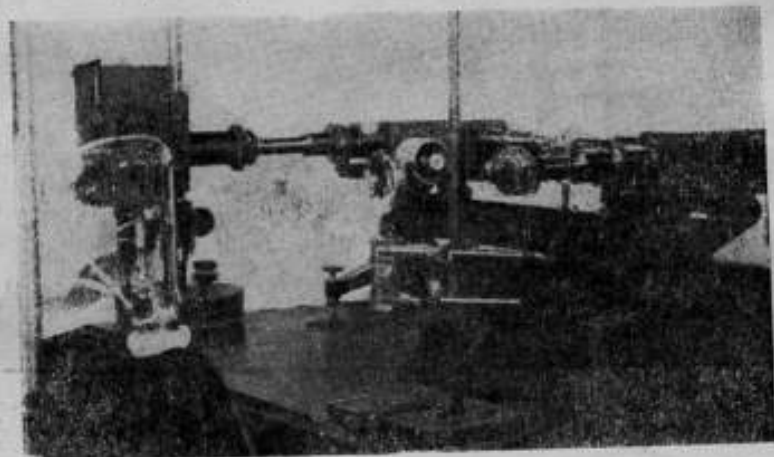


Рис. 1. Двойной монохроматор № 1.

коллиматора и телескопа — 240 мм, диаметры линз — 25 мм, преломляющий угол призмы —  $60^\circ$ ). Оба прибора также были связаны массивной металлической скрепкой и закреплены на отдельной подставке. Надежность крепления проверялась по устойчивости градуировки прибора во времени.

Основным недостатком описанных приборов является наличие у каждого двух отдельных барабанов и отсутствие спаренного перемещения призмы, что замедляет выполнение измерений и несколько затрудняет точную установку длины волны. Для устранения возможных погрешностей, связанных с этим обстоятельством, применялись такие предохранительные меры, как строго одностороннее перемещение барабанов, систематическая проверка центрировки щелей, проверка правильной установки длины волны по наибольшему отбросу гальванометра.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Этот способ проверки можно допустить при равенстве всех трех щелей двойного монохроматора.

Несколько громоздкие размеры обоих сдвоенных монохроматоров, напротив, явились преимуществом в отношении взаимного расположения отдельных частей установки, по сравнению с некоторыми конструкциями готовых двойных монохроматоров. Большая компактность последних приводит к чрезмерному сближению источника света и приемника лучистой мощности, что особенно нежелательно при работе с термоэлементом. Кроме того следует считать — и это является их основным преимуще-

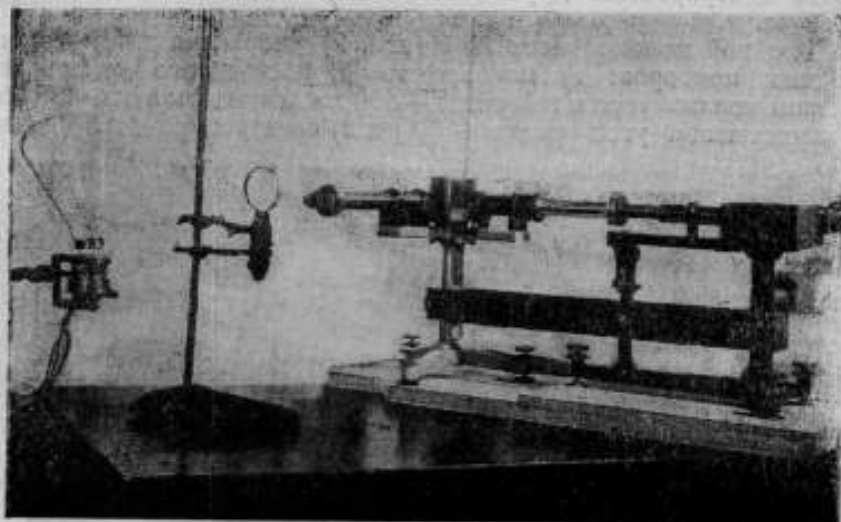


Рис. 2. Двойной монохроматор № 2.

ством, — что собранные сдвоенные приборы пропускают рассеянного света значительно меньше по сравнению с обычными готовыми двойными монохроматорами.

### 3. Градуировка двойных монохроматоров

У обоих сдвоенных приборов один из барабанов градуирован в длинах волн, второй имеет равномерную шкалу. Проверка на длины волн производилась по спектральным линиям ртути дуги и гелиевой разрядной трубки. Точность градуировки и установки длины волны при измерениях составляет около 0,1  $\text{м}\mu$  в промежутке 400—550  $\text{м}\mu$  и около 0,3—0,5  $\text{м}\mu$  в области 550—720  $\text{м}\mu$ .

### 4. Определение дисперсии

При расчетах распределения мощности для приведения прismaticкого спектра к нормальному необходимо знание дисперсии прибора. Определение ее производилось на месте следующими способами.

1. Непосредственно из кривой градуировки каждого прибора, благодаря указанному выше наличию двух барабанов с неравномерной и равномерной шкалами.

2. По измерению угловой дисперсии отдельных призм. Для этого на поворотном плече исследуемой призмы, у центра ее вращения, неподвижно закреплялось зеркальце. Отражение в нем освещенной шкалы, расположенной на расстоянии 3 м, наблюдалось в отсчетную трубу. Отсчет делений шкалы производился для целых значений длин волн по барабану и для спектральных линий ртути, введенных в окулярную щель монохроматора.

3. По измерениям линейной дисперсии в плоскости выходной щели с помощью окулярного микрометра. Объективная щель прибора освещалась одновременно ртутной дугой и гелиевой разрядной трубкой. Перемещением волоска микрометра измерялось расстояние между центрами соседних, по возможности наиболее близких,<sup>1</sup> спектральных линий.

Все три способа измерений дали совпадающие результаты. За основной для расчетов был принят первый способ. Точность определения дисперсии в данной точке можно считать около 0,1% — в синей части спектра и около 0,2% — в красной.

### 5. Измерение размеров щелей

Для последующего введения поправок на щели размеры их определялись также несколькими способами:

1) на универсальном микроскопе — в Лаборатории мер длины — и набором плиток Югансона — на месте, с точностью около 0,01 мм;

2) по размерам изображений спектральных линий в плоскости выходной щели с помощью окулярного микрометра;

3) по размерам изображений спектральных линий непосредственно в длинах волн по шкале барабана монохроматора.

Измерения на универсальном микроскопе и окулярным микрометром приняты за основные при вычислении поправок на чистоту спектра.

### 6. Коэффициенты пропускания двойных монохроматоров (некоторые теоретические обоснования)

Определение коэффициентов пропускания по спектру у двойных монохроматоров необходимо для введения в энергетические измерения соответствующих поправок на потери в приборе. Потери лучистой мощности в монохроматоре складываются из поглощения, отражения, рассеяния и ограничения (виньетирования) пучка света оптическими или другими частями прибора (например, диафрагмами). В определении этих потерь особенно надо отметить следующее.

<sup>1</sup> Чтобы избежать усреднения дисперсии на большом промежутке и смещения одной из линий в сторону от угла наименьшего отклонения.

Во-первых, вследствие неодинакового поглощения средних и боковых лучей, имеющих различную длину пути, а также вследствие неодинаковых условий ограничения пучка света в приборе значение коэффициента пропускания в большой мере зависит:

- 1) от степени заполнения поверхности призмы проходящим лучом света;
- 2) от распределения мощности в сечении пучка;
- 3) от смещения пучка по поверхности призмы при недостаточном ее заполнении.

Пояснением к последнему замечанию служит рис. 3, где представлен ход боковых пучков, выходящих из крайних по высоте точек объективной щели. Эти пучки, смещенные относительно центра призмы  $P_1$ , оказываются частично задержанными ею и линзой  $L_2$  уже в первой половине прибора. Вторая его половина представляет как бы повторную группу диафрагм. Следствием этого является, в частности, неравномерное распределение

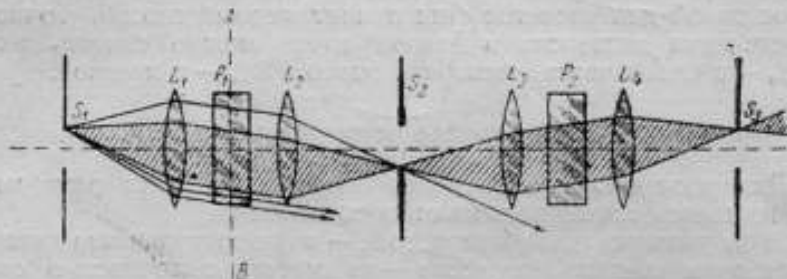


Рис. 3. Ход боковых пучков света в двойном монохроматоре.

яркости по плоскости изображения,<sup>1</sup> поскольку разные точки входной щели в неодинаковой степени участвуют в его образовании. При этом по длине спектра ограничение светового пучка может быть количественно неодинаково. Для устранения этого явления и создания определенных условий как для исследования прибора, так и дальнейшего его применения необходимо:

1) создать равномерное заполнение световым пучком всей поверхности коллиматорной линзы и

2) введением одной ограничительной диафрагмы внутри прибора обеспечить неизменность сечения светового пучка и по спектру и от всех точек входной щели. Из рис. 3 видно, что наиболее правильным было бы расположение этой диафрагмы в середине призмы, т. е. на половине длины хода луча внутри призмы (в сечении  $AB$ ); наилучшим возможным приближением к этому расположению является входная грань той же призмы. Необходимый размер диафрагмы может быть определен геометрическим построением всех лучей.

<sup>1</sup> Даже при вполне равномерной яркости источника и равномерном освещении входной щели.

Во-вторых, значение коэффициента пропускания монохроматора зависит от состояния поляризации входящего в прибор света и частичной поляризации последнего самим прибором. Согласно законам отражения Френеля, в преломленных лучах преобладает поляризация, перпендикулярная плоскости падения света. Это означает, что коэффициент пропускания для этой плоскости поляризации выше, чем для любой другой. Наименьшее значение коэффициента пропускания соответствует поляризации в плоскости, параллельной плоскости падения света. С другой стороны, степень поляризации луча света, вступившего в прибор, увеличивается с каждым последующим отражением его от поверхности раздела двух сред.

В силу этого обстоятельства, при теоретических расчетах коэффициент пропускания для естественного света определяется как среднее из значений, вычисленных отдельно для двух плоскостей поляризации. При опытном определении коэффициентов пропускания раздельные вычисления необходимо заменить двумя рядами независимых измерений в обеих плоскостях поляризации.

В обоих случаях — расчетного и опытного определения потерь — необходимо установление единообразных условий для исследования прибора и для его использования. Преимущество опытного определения заключается в непосредственном измерении суммарного действия тех явлений (многократные отражения, рассеяние, ограничение пучка и т. д.), которые существенно влияют на значение потерь в приборе, но с трудом поддаются расчету.

### 7. Коэффициенты пропускания двойных монохроматоров (измерительная установка)

Измерительная установка для определения коэффициента пропускания двойного монохроматора схематически представлена на рис. 4.

Нить накаливания источника света фокусируется с помощью линзы на входную щель первого монохроматора, закрепленного неподвижно. Второй двойной монохроматор установлен на тележке на светомерной скамье и может по ней плавно перемещаться. При указанном на рисунке положении окулярная щель первого двойного прибора находится в фокусе коллиматорной линзы второго. Объективная щель последнего при этом устранена. Остальные две щели сделаны широкими настолько, чтобы двойной монохроматор № 2 принял полностью весь лучистый поток, прошедший через прибор № 1, ослабляя его лишь соответственно своему коэффициенту пропускания для данной длины волны. Ширина  $\Delta\lambda$  спектрального участка, входящего в прибор № 2, определяется при этом исключительно дисперсией монохроматора № 1 и его щелями. В области 430—550  $m\mu$   $\Delta\lambda$  равна 0,8—2,2  $m\mu$ ; в области 550—720  $m\mu$  — 1,1—2,7  $m\mu$ . Коллиматорные линзы обоих монохроматоров при всех измерениях заполнены светом равномерно по всей поверхности.

Фотоэлемент поочередно помещался после окулярной щели первого или второго монохроматора, измеряя лучистый поток, прошедший в одном случае через один прибор, а в другом — через оба последовательно.<sup>1</sup>

При определении коэффициентов пропускания второго монохроматора источником монохроматического излучения является, так как

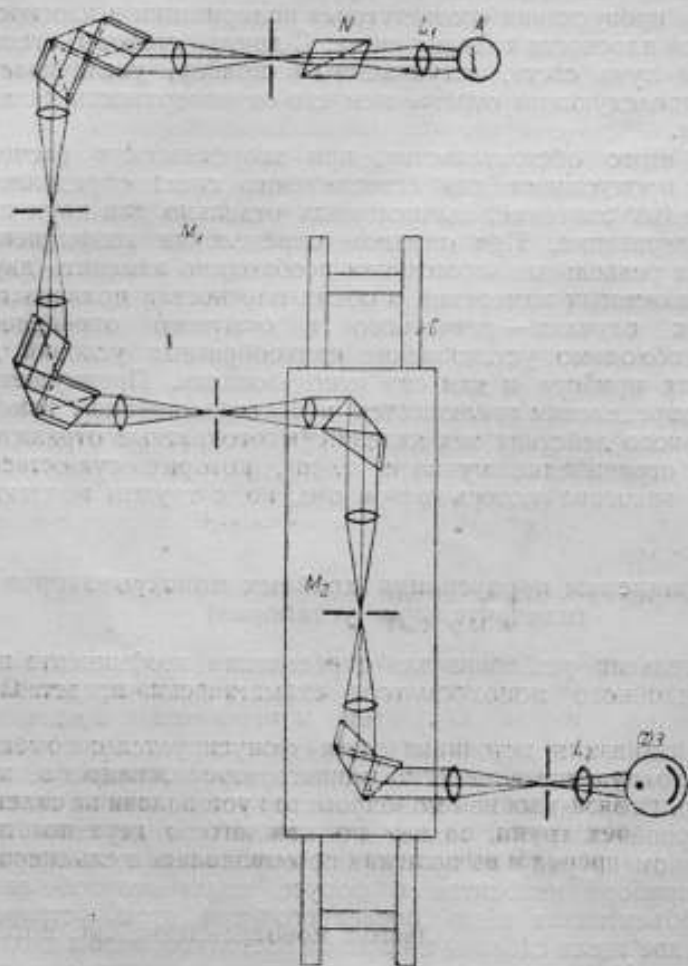


Рис. 4. Схематическое изображение установки для определения коэффициентов пропускания двойных монохроматоров.

А — источник света; L<sub>1</sub> и L<sub>2</sub> — собирающие линзы; № 1 и 2; M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub> — двойные монохроматоры; № 1 и 2; N — щель; ФЭ — фотоэлемент; C — измерительная щель.

образом, вольфрамовая лампа накаливания вместе с первым из приборов. Некоторая громоздкость такой измерительной установки

<sup>1</sup> В последнем случае перед фотоэлементом устанавливалась собирающая линза, с помощью которой в дальнейшей работе осуществлялось освещение входной щели монохроматора № 2. Ее коэффициент пропускания по спектру входил таким образом в коэффициент пропускания, определявшийся для этого прибора.

окупается—по сравнению с более простым устройством, состоящим из источника линейчатого спектра и набора цветных поглотителей,—большими чистотой спектра и устойчивостью источника излучения. Последнее обстоятельство не менее важно, чем первое, так как промежутки времени, требующиеся для связанной группы измерений, весьма значительны.

В качестве источника света была взята проекционная двухкиловаттная лампа. Напряжение ее (несколько пониженное против номинального) поддерживалось с точностью до 0,01%. Постоянство лампы во время измерений проверялось периодическими измерениями ее цветовой температуры.

Перед входной щелью первого монохроматора располагалась призма николя. Измерения производились для двух ее положений, взаимно перпендикулярных и соответствующих плоскостям поляризации, параллельной и перпендикулярной плоскости падения света. Эти положения николя определялись предварительно с помощью отдельного измерения, при котором николь помещался после окулярной щели каждого из двойных монохроматоров, непосредственно перед фотоэлементом. Ток последнего при неизменном значении длины волны, установленной по прибору, измерялся при повороте николя через каждые  $10^\circ$ .

Наибольшее и наименьшее значения тока, меняющегося по синусоидальной кривой, отвечают крайним значениям коэффициента пропускания монохроматора для соответствующих плоскостей поляризации. Точность определения этих положений невелика по абсолютной величине ( $5-10^\circ$ ), но с избытком достаточна для настоящих целей.

### 8. Измерения коэффициентов пропускания двойного монохроматора № 2

Порядок измерения коэффициентов пропускания был следующий. Наблюдения вдоль спектра делились на две половины, лежащие по обе стороны от  $550 \text{ м}\mu$ . Токи фотоэлемента измерялись в каждой половине по отношению к току средней точки ( $550 \text{ м}\mu$ ). Измерения в пределе  $430-720 \text{ м}\mu$  велись через каждые  $10 \text{ м}\mu$ .

Полный ряд связанных измерений для каждой половины спектра состоял из четырех групп, по две для каждого из двух положений николя. Измерения и вычисления производились в следующем порядке:

$$1) \left[ \frac{F_{1\lambda} \cdot S_\lambda}{F_{1550} \cdot S_{550}} \right]_i - \text{относительные монохроматические потоки}$$

энергии  $F_\lambda$ , выходящие из окулярной щели монохроматора № 1 и оцененные фотоэлементом в соответствии с его спектральной чувствительностью  $[S_\lambda]$ , при плоскости поляризации, совпадающей с плоскостью падения света;<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Громоздкость этого словесного выражения вызвана отсутствием специального определения, аналогичного понятиям световых величин  $[E_\lambda \cdot v_\lambda]$ , для реакции объективных приемников лучистой энергии, имеющих свою форму спектральной чувствительности.

$$2) \left[ \frac{F_{1,2\lambda} \cdot S_{\lambda}}{F_{1,2550} \cdot S_{550}} \right]_{\perp} \text{ — относительные монохроматические потоки}$$

энергии, выходящие из окулярной щели монохроматора № 2 (последовательно соединенного с № 1) и оцененные фотоэлементом в соответствии с его спектральной чувствительностью, при той же плоскости поляризации;

$$3) \left[ \frac{F_{1\lambda} \cdot S_{\lambda}}{F_{1550} \cdot S_{550}} \right]_{\perp} \text{ — относительные монохроматические потоки}$$

энергии монохроматора № 1, оцененные фотоэлементом в соответствии с его спектральной чувствительностью, для плоскости поляризации, перпендикулярной плоскости падения света;

$$4) \left[ \frac{F_{1,2\lambda} \cdot S_{\lambda}}{F_{1,2550} \cdot S_{550}} \right]_{\perp} \text{ — относительные монохроматические потоки}$$

энергии, выходящие из окулярной щели монохроматора № 2, последовательно соединенного с № 1, и оцененные фотоэлементом в соответствии с его спектральной чувствительностью, при той же плоскости поляризации.

Каждая из этих групп измерений включает все точки данной половины спектра. Наблюдения при длине волны 550 мμ внутри каждой группы измерений повторялись многократно.

Относительный коэффициент пропускания для каждой из плоскостей поляризации вычислялся по формулам:

$$\tau_{\parallel\lambda} = \left[ \frac{F_{1,2\lambda}}{F_{1,2550}} \cdot \frac{F_{1550}}{F_{1\lambda}} \right]_{\perp}$$

и

$$\tau_{\perp\lambda} = \left[ \frac{F_{1,2\lambda}}{F_{1,2550}} \cdot \frac{F_{1550}}{F_{1\lambda}} \right]_{\perp}$$

Значения относительных коэффициентов пропускания для обеих плоскостей поляризации приведены на рис. 5.

Для двух плоскостей поляризации наблюдается систематическое, но сравнительно небольшое различие коэффициентов пропускания; ход кривых подобен в обоих случаях.

Пропускание прибора для естественного света ( $\tau$ ) вычислено как среднее из коэффициентов пропускания для двух взаимно перпендикулярных плоскостей поляризации. Так как по предыдущим измерениям известны лишь относительные значения каждого из коэффициентов пропускания, то для вычисления среднего значения необходимо определить их соотношение друг с другом. Для этого были произведены многократные измерения следующих величин в указанном порядке: 1)  $[F_{1550} \cdot S_{550}]_{\perp}$ ; 2)  $[F_{1,2550} \cdot S_{550}]_{\perp}$ ; 3)  $[F_{1550} \cdot S_{550}]_{\perp}$ ; 4)  $[F_{1,2550} \cdot S_{550}]_{\perp}$ ; индекс „550“ показывает на выполнение измерений при 550 мμ.

На основании этих измерений, для двойного монохроматора № 2 установлено соотношение  $\left[ \frac{\tau_{\parallel}}{\tau_{\perp}} \right] = 0,48$ . Сравнительно невысокая



точность определения этой величины не имеет существенного значения ввиду большого сходства в относительных изменениях по спектру обоих коэффициентов.

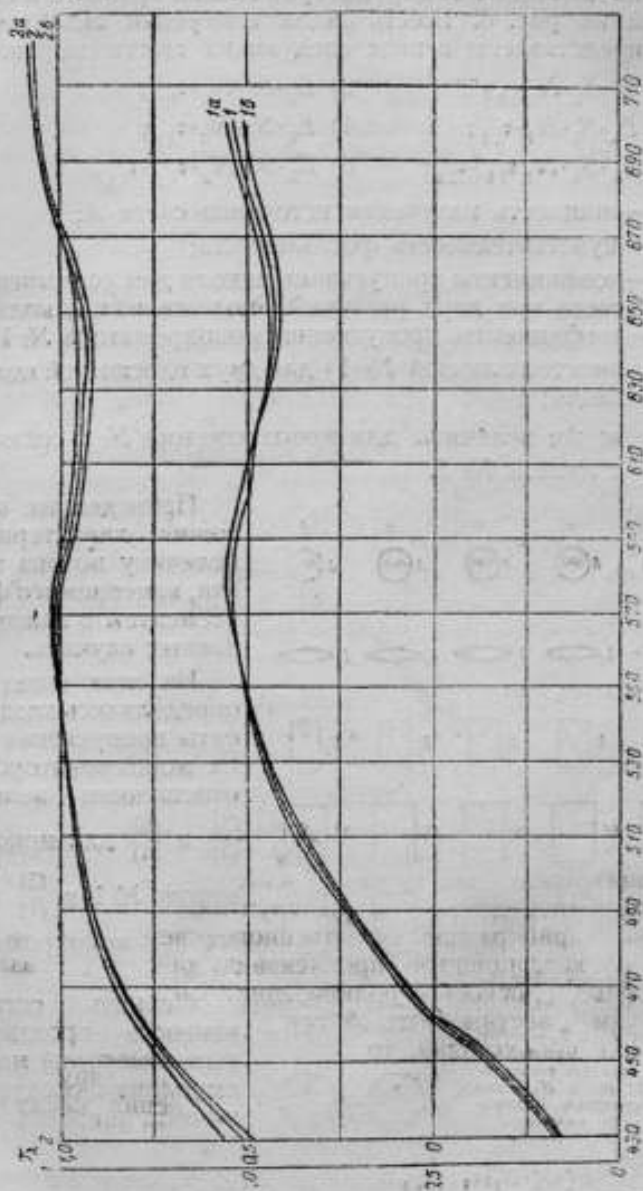


Рис. 5. Коэффициенты пропускания двойных монохроматоров № 1 и 2 для естественного света и двух плоскостей поляризации, 1 —  $\tau_{1,1}$ ; 1b —  $\tau_{1,2}$ ; 2a —  $\tau_{2,1}$ ; 2b —  $\tau_{2,2}$ .

Подобным же образом, — с некоторыми изменениями технического, но не принципиального характера в измерительной установке, — велось определение коэффициентов пропускания двойного монохроматора № 1.

## 9. Согласованность измерений

Приведенные измерения по определению коэффициентов пропускания обоих двойных монохроматоров можно привести к схеме, изображенной на рис. 6. Шесть рядов измерений аналитически могут быть представлены в виде следующих шести выражений:

$$\begin{array}{ll}
 1) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_1 \cdot \tau_{11}; & 2) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_2 \cdot \tau_{11}; \\
 3) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_1 \cdot \tau_{21}; & 4) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_2 \cdot \tau_{21}; \\
 5) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_1 \cdot \tau_{1\perp} \cdot \tau_{2\perp}; & 6) E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_2 \cdot \tau_{1\perp} \cdot \tau_{2\perp},
 \end{array}$$

где  $E_\lambda$  — мощность излучения источника света  $A$ ;  
 $S_\lambda$  — чувствительность фотозлемента;  
 $N_1$  и  $N_2$  — коэффициенты пропускания николя для естественного света при двух различных положениях николя;  
 $\tau_{11}$  и  $\tau_{1\perp}$  — коэффициенты пропускания монохроматора № 1 (совместно с линзой № 1) для двух плоскостей поляризации;  
 $\tau_{21}$  и  $\tau_{2\perp}$  — те же величины для монохроматора № 2 совместно с линзой № 2.

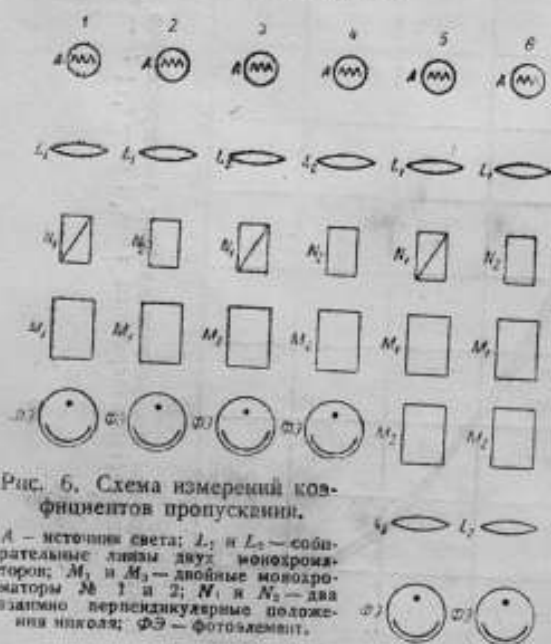


Рис. 6. Схема измерений коэффициентов пропускания.

$A$  — источник света;  $L_1$  и  $L_2$  — собирающие линзы двух монохроматоров;  $M_1$  и  $M_2$  — двойные монохроматоры № 1 и 2;  $N_1$  и  $N_2$  — два взаимно перпендикулярных положения николя;  $\Phi Э$  — фотозлемент.

Приведенные выражения характеризуют величину потока энергии, измеряемого фотозлементом в каждом из данных случаев.

Из этих измерений определялись коэффициенты пропускания обоих монохроматоров по отношениям величин:  $\frac{(5)}{(3)}$  и  $\frac{(6)}{(4)}$  для монохроматора № 1 и  $\frac{(5)}{(1)}$  и  $\frac{(6)}{(2)}$  для монохроматора № 2.

Оценить согласованность произведенных измерений можно, выполнив следующие вычисления:

$$1) \frac{(1) \cdot (3)}{(5)} = \frac{E_\lambda^2 \cdot S_\lambda^2 \cdot N_1^2 \cdot \tau_{11} \cdot \tau_{21}}{E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_1 \cdot \tau_{11} \cdot \tau_{21}} = E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_1;$$

$$2) \frac{(2) \cdot (4)}{(6)} = \frac{E_\lambda^2 \cdot S_\lambda^2 \cdot N_2^2 \cdot \tau_{11} \cdot \tau_{21}}{E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_2 \cdot \tau_{11} \cdot \tau_{21}} = E_\lambda \cdot S_\lambda \cdot N_2.$$

Полученные выражения разнятся лишь на коэффициент пропускания призмы николя для естественного света при различных его положениях. Теоретически он должен быть одинаков; практически из-за неполного поглощения части лучей на вычерпанных гранях призмы на основное изображение проходящего через николь пучка света могут накладываться неравномерные блики отраженных излучений. Выяснить возможность такой ошибки и ее порядок представлялось необходимым. Произведенные вычисления показали согласованность измерений в пределах их точности (около 1—1,5%).

### III. ПРИЕМНИКИ ЛУЧИСТОЙ МОЩНОСТИ

#### 1. Фотоэлементы

При измерениях коэффициентов пропускания двойных монохроматоров употреблялись фотоэлементы двух видов: 1) сурьмяноцезиевые вакуумные (марки СЦВ) и 2) кислородноцезиевые газополные (марки RCA). Кривые спектральной чувствительности этих фотоэлементов приведены на рис. 7.

Сурьмяноцезиевые фотоэлементы применялись преимущественно в коротковолновой части спектра, кислородноцезиевые —

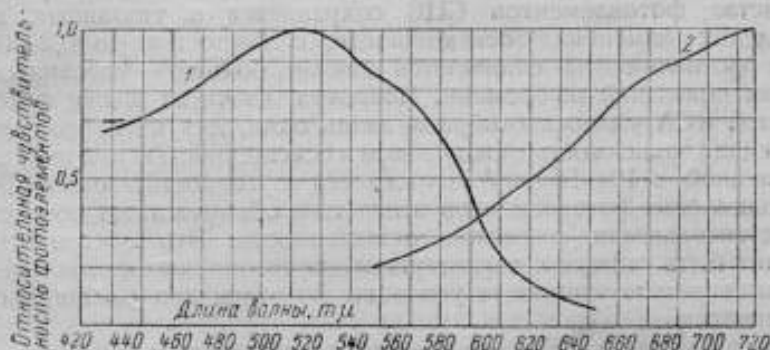


Рис. 7. Спектральная чувствительность фотоэлементов сурьмяноцезиевого (кривая 1) и кислородноцезиевого (кривая 2).

в длинноволновой; некоторая доля измерений в средней спектральной области выполнялась с помощью обоих фотоэлементов.

Применение фотоэлементов для точных, хотя бы и относительных измерений светового потока или освещенности требует от них следующих основных качеств: устойчивости показаний во времени и прямолинейной зависимости между током и освещенностью. Последнее условие должно соблюдаться по меньшей мере в тех пределах изменения освещенности, которые имеют место в каждом данном случае.

<sup>1</sup> Речь идет исключительно о приемниках лучистой энергии, применявшихся в настоящей работе.



Изменения освещенности в измерениях коэффициента пропускания для излучения данной длины волны зависят: 1) от абсолютного значения коэффициента пропускания; 2) от дисперсии прибора; 3) от распределения чистой энергии в спектре источника. Для настоящих измерений было существенно, чтобы фотозлемент сохранял пропорциональную зависимость своего тока от освещенности в пределах около 25—30-кратного изменения ее при сравнительно малых значениях (в синей части спектра) и в пределах 4—6-кратного ее изменения при высоких значениях освещенности (в красной части спектра), превышающих малые в 150—200 раз.

Прямолинейность зависимости фототока от освещенности проверялась для обоих видов фотозлементов двумя способами: по закону квадратов расстояний на светомерной скамье—в пределах до 70 раз и с помощью секторных дисков известного раскрытия—в пределах до 100 раз.

Безинерционность фотозлементов с внешним фотоэффектом позволяет применять с ними вращающиеся поглотители. Однако измерения фототоков при этом должны выполняться компенсационным методом с нулевым отсчетом, так как в иных способах измерений пульсирующий фототок трудно определять с достаточной точностью.

Пропорциональность между током и освещенностью для большинства фотозлементов СЦВ сохраняется в указанных выше пределах изменения освещенности, с точностью до 0,2—0,3%. Эти фотозлементы отличаются также большой устойчивостью своих показаний во времени. Напротив, из числа шести фотозлементов RCA удалось отобрать лишь один, для которого прямолинейная зависимость между током и освещенностью при изменении последней в 10—15 раз<sup>1</sup> сохраняется с точностью около 0,5%. Большинство фотозлементов этого типа обнаруживает повышение чувствительности с ростом освещенности. Это обстоятельство может быть связано с характерным для газополных фотозлементов повышением коэффициента усиления фототока при больших освещенностях.

Устойчивые в своих показаниях во времени, с ничтожным по величине темновым током<sup>2</sup> фотозлементы RCA, как газополные, опять-таки невыгодно отличаются от фотозлементов СЦВ быстро-растущей зависимостью тока от анодного напряжения: до 10% в силе тока на 1% изменения напряжения. Отсюда вытекают повышенные требования к устойчивости анодной батареи при работе с этими фотозлементами.

У всех фотозлементов, применявшихся в настоящей работе, обнаружены (посредством отдельных испытаний) значительные (в единичных случаях до 40—50% от среднего) изменения чувствительности по поверхности катода. В связи с этим потребовались особые предохранительные меры для того, чтобы обеспечить, по

<sup>1</sup> Эти пределы изменения освещенности достаточны для применения фотозлемента RCA, работающего в длинноволновой части спектра.

<sup>2</sup> Фотозлементы СЦВ, напротив, обнаруживают значительный темновой ток.

крайней мере в связанных между собой измерениях, работу строго одного и того же участка поверхности катода.

Испытания фотоэлементов, а также все измерения коэффициентов пропускания двойных монохроматоров производились при включении фотоэлементов на высокоомную рамку зеркального гальванометра. Чувствительность последнего (с учетом увеличенного до  $5,5 \text{ м}$  расстояния от зеркальца гальванометра до шкалы) составляла около  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ А}$  на  $1 \text{ м.м.}$  В случае больших отклонений зеркальца гальванометра (при токах порядка  $2-5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ ) учитывалась поправка на прямолинейность шкалы.

Наименьшие значения измерявшихся токов (около  $5-8 \cdot 10^{-11} \text{ А}$ ) предъявляли повышенные требования к электрической изоляции измерительной установки. Ей было уделено особое внимание. Вся проводка была выполнена экранированным проводом с высокой изоляцией; опорные ролики, по возможности малочисленные, были залиты парафином; приборы были дополнительно изолированы; цепь питания источника света изолирована и удалена от цепи фотоэлемента; соответствующие точки измерительной установки, так же как металлический футляр фотоэлемента, заземлены.

## 2. Термостолбик

Для измерения распределения лучистой мощности в спектре вольфрамовой лампы применялся термостолбик Хилгера, представляющий собою последовательное соединение 10 спаев висмута и серебра (рис. 8). Термостолбик этот отличается высокой чувствительностью.

Расположение спаев в виде вытянутой по вертикали полоски весьма удобно для спектральных измерений, где щель прибора также вытянута по высоте. Известным недостатком является расположение спаев на некотором расстоянии друг от друга, вследствие чего часть излучения проходит насквозь, минуя спай. Это связано и с потерей чувствительности и с возможной погрешностью в случае неоднородного распределения лучистой мощности по высоте щели. Противовесом к влияниям такого рода отчасти служит перестановка термостолбика при повторных измерениях, причем чувствительные спай его располагаются различным образом по высоте щели.

К чувствительным спаям термостолбика прикреплены зачерненные копотью тонкие серебряные листочки, непосредственно воспринимающие падающую на спай лучистую энергию.

Основным условием в выполнении измерений распределения энергии в спектре является полная „чернота“ воспринимающей поверхности, т. е. неизменность ее коэффициента поглощения по спектру. Последнее особо проверялось на опыте измерением относительных коэффициентов отражения для излучений различных цветов.

Схема установки представлена на рис. 9. Обозначения рисунка:  $S_1$  и  $S_2$ —два источника света для освещения пластинки сравнения  $P$

и термостолбика  $TЭ$ ;  $M$ —светомерная скамья, по которой перемещается  $S_1$ ,  $\Phi$ —цветной сменный фильтр;  $L$ —линза,  $K_1$ —фильтр и кювета с водой для устранения инфракрасного излучения;  $K_2$ —фотометрический кубик с полем в виде маленького кружка в середине широкого кольца.



Рис. 8. Термостолбик Хилгера.

Абсолютное значение коэффициента отражения для воспринимающей поверхности термостолбика оказалось около 0,01. Относительные его значения в разных областях спектра практически, т. е. в пределах точности измерений (около 0,5%), не отличаются друг от друга.

Между мощностью лучистой энергии, поглощенной воспринимающей поверхностью термоэлемента, степенью ее нагрева и термоэлектродвижущей силой существует пропорциональность, если только нагрев не превышает некоторой величины порядка 8—10°. Сохранение пропорциональности между термотоком и освещенностью следовало проверить для имевшихся условий измерений. Пределы изменения освещенности определяются в данном случае изменениями по спектру лучистой мощности, прошедшей через прибор. В соответствии с принятым (см. ниже) при измерениях с термостолбиком делением видимой области спектра на три участка, сохранение пропорциональности между термотоком и освещенностью требуется лишь

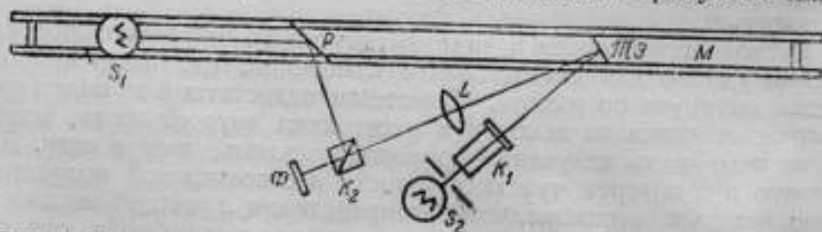


Рис. 9. Схематическое изображение установки для определения «черноты» приемной поверхности термостолбика.

в пределах изменения последней внутри каждого из этих трех спектральных промежутков. Эти пределы составляют для каждого участка всего 8—9 раз.

Посредством особых измерений, с применением закона квадратов расстояний, было проверено, что прямая пропорциональность между термотоком и освещенностью при изменении последней примерно в 15 раз сохраняется в пределах точности измерений около 0,4—0,5%. При дальнейшем повышении освещенности наблюдается снижение чувствительности термостолбика.

Условия работы с термоэлементами по сравнению с измерением фототоков представляют значительно большие трудности. В основном эти последние сводятся к следующему:

а) Недостаточная чувствительность для тех областей спектра, где малы значения лучистой мощности. Неселективный приемник лучистой энергии—термостолбик—оказывается здесь в особо неблагоприятных условиях.

б) Сильные неблагоприятные влияния посторонних электромагнитных полей.

Эти влияния выражаются в возникновении токов случайного характера и направления и, соответственно, в непрерывном качании зеркала гальванометра в пределах до 2—4 мм и даже более. Значительность этих помех в измерительной цепи термоэлемента является следствием ее малого сопротивления;<sup>1</sup> в цепи фотозащитных элементов с высоким сопротивлением посторонние влияния такого рода практически не сказываются.

в) Большая чувствительность термоэлемента (отсутствующая у большинства фотозащитных элементов) к посторонним температурным влияниям.

Как следствие этой чувствительности и колебаний окружающей температуры, в цепи термоэлемента возникают случайные термотоки и наблюдается неустойчивость в положении нуля гальванометра.

Перечисленные особенности измерений термотоков требуют и особых мер для облегчения условий работы и повышения надежности получаемых результатов. Такие меры по возможности были приняты.

а) В настоящих измерениях термостолбик был подключен к малоомной рамке указанного выше гальванометра, сопротивление которой составляет около 11  $\Omega$  и близко по абсолютному значению к сопротивлению термостолбика. Чувствительность гальванометра при расположении шкалы на 5,5 мм от зеркала составляет около  $1,5 \cdot 10^{-8}$  В на 1 мм шкалы. Дальнейшее повышение чувствительности достигалось посредством вспомогательного зеркала, установленного непосредственно перед зеркалом гальванометра. Повторное отражение светового луча от зеркала давало удвоение угла отклонения (рис. 10).

б) Частичное устранение внешних электромагнитных полей достигалось последовательным включением в измерительную цепь термостолбика обмотки вспомогательного гальванометра, ориентированной относительно обмотки основного таким образом, что токи, индуктирующиеся в обеих, направлены навстречу друг другу. В силу неполного равенства обеих обмоток уничтожить целиком влияния внешних полей этим путем не удалось.

Более радикальным и вполне удовлетворительным средством оказалась работа в ночные часы, когда прекращается трамвайное движение и отсутствуют или ослаблены и другие внешние помехи.

в) Для устранения температурных влияний рекомендуется применение компенсационного термоэлемента, включаемого в цепь

<sup>1</sup> Что, с другой стороны, составляет условие наилучшего использования чувствительности приемника, внутреннее сопротивление которого должно быть равно внешнему сопротивлению его цепи.

основного в непосредственной от него близости, но не подвергающегося освещению измеряемым излучением. Основным условием действительности такого способа является полное единообразие обоих термоземлентов; в противном случае неполная температурная компенсация может оказаться только лишней помехой. За отсут-

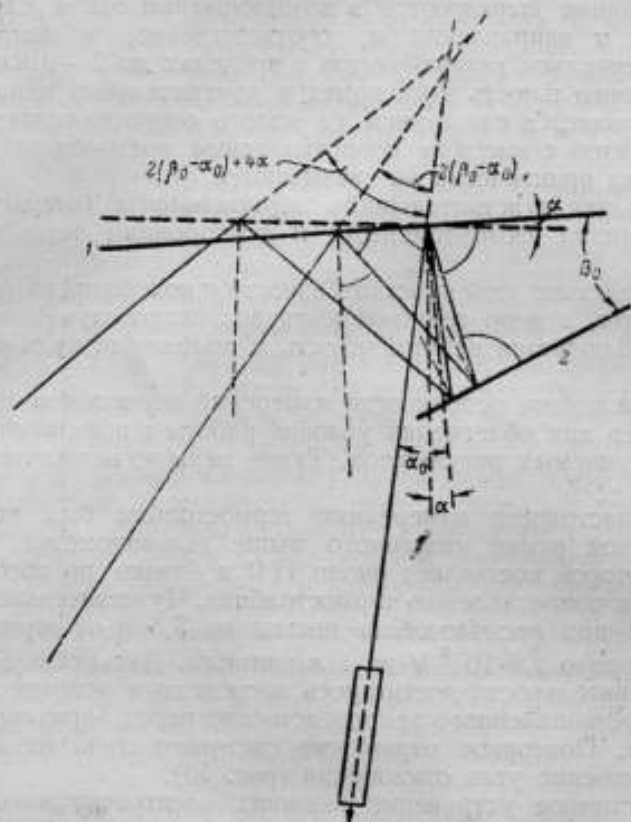


Рис. 10. Схематическое изображение установки с вспомогательным зеркалом с целью оптического увеличения отклонений гальванометра.

1 — зеркало гальванометра; 2 — вспомогательное зеркало.

ствием такого второго, вполне одинакового термостолбика названный способ не был использован. Применялась лишь усиленная тепловая изоляция термостолбика от окружающих источников излучения и от движения воздуха. Термостолбик помещался в металлической массивной насадке, закрытой с задней стороны наглухо. Все место расположения термостолбика окружалось несколькими слоями плотной ткани. Между задней стенкой термостолбика и источником света, освещающим входную щель моно-



хроматора, были установлены на некоторых расстояниях друг от друга три металлических щита.

Однако вследствие все же неполного устранения влияния наружных колебаний температуры и почти непрерывного, хотя и медленного, сползания нуля гальванометра, потребовался особый способ отсчета. Примененный здесь прием состоит в том, что повторные отсчеты показаний гальванометра для освещенного и неосвещенного термостолбика производятся через строго определенные одинаковые промежутки времени, считая от момента подачи освещения на поверхность термостолбика в первом случае и от момента выключения этого освещения — во втором. Для

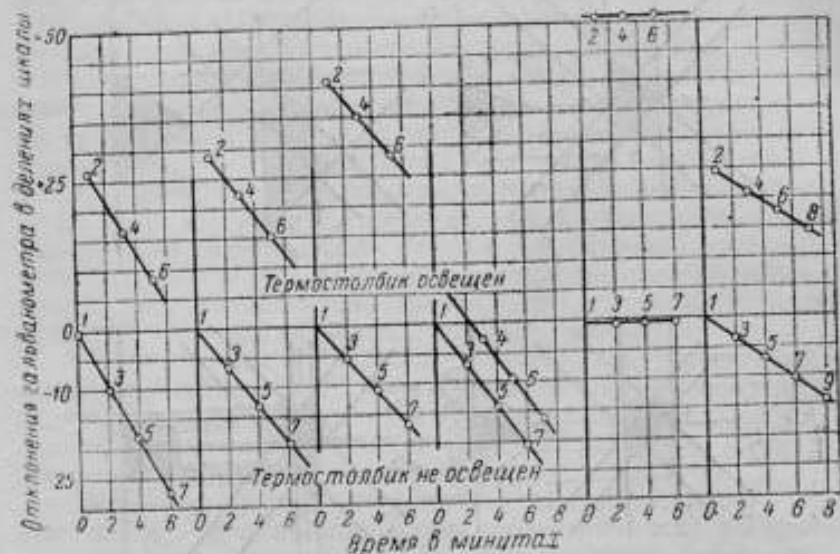


Рис. 11. Измерения термотоков по времени.

каждого данного положения в спектре снимается последовательно несколько пар таких отсчетов. Время отмечается по секундомеру. Сползание нуля гальванометра за время измерений выявляется в наклоне прямых, приведенных на рис. 11.

Здесь для примера приведено несколько отдельных измерений, именно в том виде, как они выполнялись в действительности. Точками обозначены отмеченные положения зеркала гальванометра для освещенного и затемненного термостолбика. Номера, обозначенные над точками, указывают на последовательность производившихся измерений. Последние выполнялись в данных измерениях через одну минуту, что видно на рисунке, в чередующемся порядке, при освещенном и затемненном термостолбике.

Действительное значение тока в цепи определяется как среднее расстояние между прямыми «света» и «темноты». Неопределенность в положении нуля устраняется или ограничивается таким

образом посредством точной регистрации времени. Промежуток времени должен быть по возможности мал, но наименьшая величина его ограничивается временем, необходимым для установки тока термоэлемента. Обычно отсчеты производились через 30—60 сек., причем точность полученного значения составляла при таком способе измерений не менее  $\pm 0,3-0,4\%$ .

#### IV. О ВЫБОРЕ ЩЕЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОПРАВОК НА ИХ РАЗМЕРЫ

Во всяком спектральном приборе щели играют двойную и противоречивую роль: с одной стороны, они ограничивают коли-

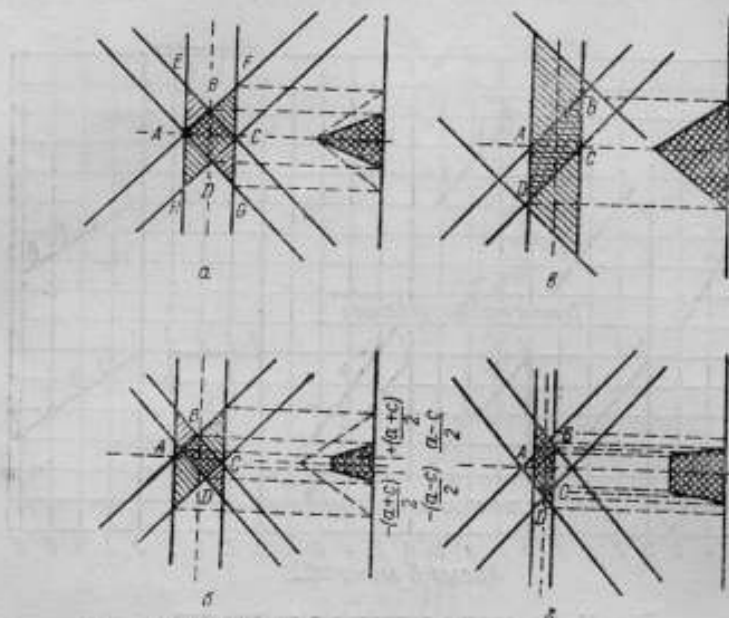


Рис. 12. Соотношения геометрических размеров щелей двойного монохроматора.

чество проходящей через прибор лучистой энергии, с другой — определяют ширину вырезанного спектрального участка. Увеличение количества лучистой энергии сопровождается снижением чистоты спектра. Между крайними возможными положениями ищется наилучшее, удовлетворяющее чувствительности данной измерительной установки, с одной стороны, и требованиям, предъявляемым задачей исследования к чистоте спектра, с другой.

Для двойного монохроматора, так же, как и для одиночного, наилучшим сочетанием в отношении чистоты спектра и наиболее выгодного использования прибора является равенство геометрических размеров всех трех щелей. Иллюстрацией к этому положению может служить рис. 12, где представлены различные случаи взаимодействия трех щелей двойного монохроматора в образовании спектра последней щели.

Рис. 12, *а*, *б*, *в* и *г* отвечают следующим соотношениям в размерах щелей: *а*—все три щели равны; *б*—входная и средняя щели равны, выходная—меньше каждой из них; *в*—входная и средняя щели равны, выходная—больше каждой из них; *г*—входная щель меньше средней и выходной, которые равны друг другу.

Границы спектрального участка ( $\Delta\lambda$ ), проходящего через прибор, т. е. чистота спектра, определяются крайними точками той геометрической фигуры, которая образуется от пересечения пограничных лучей, пропущенных всеми тремя щелями. Площадь этой фигуры пропорциональна прошедшей через двойной монохроматор лучистой энергии. Соотношение размеров этой полезной площади (*ABCD*) и общей площади остальных участков (*AEB*, *BPC*, *CDG* и *ADH*), ограниченных вне ее пересечением лучей только двух щелей и определяющих собой рассеянный свет в приборе, является мерой целесообразного использования каждой щели. Чрезмерное изменение ширины какой-либо одной из них по сравнению с размерами других щелей повышает (если не абсолютное, то относительное) количество рассеянного света в общей доле лучистой энергии, прошедшей через прибор.

На том же рис. 12 представлены кривые пропускания для вырезанного спектрального участка при различных взаимных сочетаниях трех щелей. Очевидно, наимыгоднейшей является форма кривой пропускания в виде треугольника, когда только излучение установленной длины волны проходит полностью.

Эта форма, как и наименьшее количество рассеянного света, отвечает равенству всех трех щелей двойного монохроматора.

Необходимость введения в итоги спектральных измерений поправок на конечные размеры щелей обусловлена двумя причинами, искажающими непосредственный результат измерений: 1) дисперсией прибора, изменяющей действительный размер щели по спектру (при ее постоянном геометрическом раскрытии), и 2) смещением спектра в плоскости окулярной щели вследствие взаимного наложения в ней отдельных монохроматических изображений входной щели. Значение последней поправки растет с размером щелей и зависит от характера изменений в данной области спектра каждой из следующих величин: лучистой мощности источника, пропускания прибора и чувствительности приемника лучистой энергии.

Первая поправка—на дисперсию прибора—учитывается обычно лишь при тех измерениях, где сравнение производится между излучениями различных участков спектра (например, при измерениях лучистой мощности), а не тогда, когда в данной точке спектра определяется относительное значение какой-либо величины (например, коэффициента пропускания или отражения).

Вторая поправка—на чистоту спектра—теоретически должна учитываться во всех случаях.

Способ введения последней поправки—на чистоту спектра,—разработанный Пашеном [12] и затем Рибо и Пейшесом [13], опирается на графическое построение и уже поэтому не отличается особой точностью. Определение этой поправки тем не

менее необходимо—не столько для исправления измеренных значений, сколько для проверки правильности выбора щелей. Критерием последнего являются малые значения поправок, вычисленных для взятых размеров. По сравнению с другими погрешностями измерений, погрешности, внесенные конечной чистотой спектра, должны иметь ничтожное значение.

Обе поправочные формулы Пашена и Рибо выведены только для случая равных щелей одиночного монохроматора (причем ширина каждой щели равна  $b$ , а ширина выделенного спектрального участка  $2b$ ).

Пашен обозначает через  $f(x)$  лучистую энергию в точке  $x$ , соответствующей некоторому положению в спектре. В указанных условиях приемник лучистой энергии получает, кроме излучения  $f(x)$ , попадающего на него полностью, также и излучение других длин волн; последние действуют лишь частично вследствие смещения изображения. Доля излучения, падающего на приемник от смещенного изображения, определяется выражением  $\frac{b-v}{b}$ , где  $v$ —величина смещения по спектру.

Реакция приемника, вызванная общим, но неодинаковым действием всех излучений в промежутке от  $-b$  до  $+b$ , выражается как

$$F_x = \int_0^b \frac{b-v}{b} [f(x+v) + f(x-v)] dx.$$

Приведенный интеграл разлагается в ряд, из которого можно найти лучистую энергию  $f(x)$ , соответствующую определенному положению  $x$  в спектре:

$$bf(x) = F(x) - \frac{1}{6} F_1(x) + \frac{2}{45} F_2(x), \quad (1)$$

где

$$F_1(x) = \frac{F(x+b) + F(x-b)}{2} - F(x)$$

и

$$F_2(x) = \frac{F_1(x+b) + F_1(x-b)}{2} - F_1(x).$$

Значения функции  $F$  для положений  $x+b$  и  $x-b$  находятся графически.

Рибо и Пейшес пришли практически к тому же поправочному коэффициенту, вводя в подинтегральное выражение следующие величины:

1) параболическую функцию  $f(x) = f_0(1 + \alpha x + \beta x^2)$ , выражающую суммарную зависимость от положения в спектре лучистой энергии источника, пропускания прибора и чувствительности приемника, т. е. фактически реакцию приемника в данной точке спектра и в данных условиях;

2) подобного же вида функцию  $\tau_x = \tau_0 (1 + px + qx^2)$ , определяющую зависимость от положения в спектре измеряемой величины, например коэффициента пропускания стекла или в данном случае монохроматора;

3) уравнение кривой пропускания  $\varphi_x = \varphi_0 \left(1 \mp \frac{x}{b}\right)$  для щелей прибора.

В различных случаях измерений общую реакцию приемника, воспринимающего в плоскости окулярной щели смешанные излучения в пределах от  $-b$  до  $+b$ , можно выразить как

$$F_x = f_0 \tau_0 \int_{-b}^{+b} (1 + \alpha x + \beta x^2) \left(1 \mp \frac{x}{b}\right) dx = f_0 \varphi_0 b \left(1 + \frac{\beta \alpha \beta}{6}\right) \quad (2)$$

или

$$\begin{aligned} F_x &= f_0 \varphi_0 \tau_0 \int_{-b}^{+b} (1 + \alpha x + \beta x^2) (1 + px + qx^2) \left(1 \mp \frac{x}{b}\right) dx = \\ &= f_0 \varphi_0 \tau_0 \left[1 + \frac{\beta^2}{6} (\alpha p + b + q) + \frac{\beta^4}{15} b q\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Практически в большинстве случаев [при достаточно пологом ходе кривой  $F(x)$ ] можно пользоваться упрощенным выражением (2) или отбрасывать второй поправочный коэффициент в уравнении Пашена (1). Коэффициент  $\beta$  в выражении (2) может определяться графически.

Все три формулы возможно использовать и в двойном монохроматоре, при условии равенства его щелей. При нарушении этого условия, например при ограниченных размерах окулярной щели (см. ниже) и трапецидальной (а не треугольной) кривой пропускания щелей прибора, поправочные формулы должны быть видоизменены. Обозначая  $2a$  и  $2c$  соответственно раскрытия объективной и окулярной щели двойного монохроматора, имеем для реакции приемника выражение

$$F_x = f_0 \varphi_0 2c \left[1 + \frac{\beta}{3} (a^2 + c^2)\right]. \quad (4)$$

Ширина выделенного спектрального участка в плоскости окулярной щели равна при этом  $2(a+c)$ .

Для сравнения поправочных коэффициентов в случае треугольной и трапецидальной кривой пропускания щелей следует выбрать равную чистоту спектра, т. е. приравнять  $b$  и  $a+c$ .

Тогда

$$\beta \frac{a^2 + c^2}{3} - \frac{\beta (a+c)^2}{6} = \frac{\beta}{6} (a-c)^2$$

и

$$d_2 = d_1 + \frac{\beta}{6} (a-c)^2,$$

где  $d_1$  — поправка при треугольной форме кривой пропускания щели, а

$d_2$  — поправка при трапецидальной форме.

Таким образом, ограничения размеров одной из щелей двойного монохроматора по сравнению с другими и переход в пропускании их от треугольной формы к форме трапеции увеличивают погрешность измерений.

### 1. Введение поправок на размер щелей при измерении относительного распределения мощности в спектре

Небольшые размеры воспринимающей поверхности термостолбика Хилгера (ширина полоски около 0,5 мм) не позволяют по всему спектру применять равные щели. Сама полоска заменяет собою окулярную щель. Средние и объективная щели устанавливались равными 0,5 мм лишь в красной половине спектра, от 550 мμ и выше. В синей части, в пределах 550—480 мμ раскрытие этих щелей доводилось до 0,8 мм и в пределах 450—420 мμ — до 1,3 мм.

Ширина половины спектрального участка в миллимикронах указана в табл. 1.

Таблица 1

| Монохроматор | 420—480 мμ | 480—550 мμ | 550—720 мμ |
|--------------|------------|------------|------------|
| № 1          | 3—6        | 4—6        | 2—6        |
| № 2          | 6—10       | 7—12       | 4—10       |

Расширение щелей вызвано малыми значениями лучистой мощности в коротковолновой части спектра. Для этого случая — применения щелей разных размеров — и было выведено в настоящей работе выражение поправочного коэффициента при трапецидальной форме кривой пропускания.

Определение поправок на размер щелей велось следующим образом. Отклонения гальванометра наносились на график в функции длины волны. Ширина спектрального промежутка  $\Delta\lambda$  вычислялась для каждой длины волны, где производились измерения, по значению линейной дисперсии в этой точке. Отклонения, соответствующие положениям в спектре  $\lambda \pm \Delta\lambda$ , находились из графика. Величина  $\beta$  в данной точке вычислялась как

$$\beta = \frac{F_{\lambda-\Delta\lambda} - F_{\lambda} + F_{\lambda+\Delta\lambda} - F_{\lambda}}{2(\Delta\lambda)^2} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2(\Delta\lambda)^2}$$

Выше 550 мμ применялся поправочный коэффициент для равных щелей монохроматора. При значениях длин волн, меньших 550 мμ, учитывалась трапецидальная форма кривой пропускания щелей.

Значения поправок, несмотря на довольно большие размеры щелей, не превышают обычно  $0,1\%$ . В качестве примера приведено определение поправок для измерений, произведенных на монохроматоре № 2 (табл. 2).

Графическое определение промежуточных данных, нужных для расчета, устанавливает предел необходимой точности в определении геометрических размеров щелей. Практически нет необходимости определять их с большей точностью, чем  $0,05$  мк.

## 2. Поправка на дисперсию прибора

В выражения (1), (2), (3), (4) как множитель входит величина, равная или пропорциональная ширине спектрального промежутка ( $a$  или  $c$ ). При постоянстве геометрических размеров щелей размеры эти в длинах волны меняются вследствие дисперсии прибора. Соответственно, в разных участках спектра одна и та же щель выделяет большее или меньшее количество лучистой мощности. Результаты измерений должны быть приведены к нормальному спектру, для чего каждое показание следует разделить на ширину спектрального участка в данной точке.

Эта поправка выпадает в случае измерений, подобных определению коэффициента пропускания, где вычисляется отношение двух величин, измеренных для одинакового положения в спектре. При измерениях относительного распределения мощности в спектре сравниваются друг с другом излучения различных участков, отличающихся разной дисперсией прибора. Введение поправки на дисперсию при этом обязательно и существенно.

В вычислениях возможно вводить значения относительной дисперсии прибора по спектру.

## V. ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ МОЩНОСТИ В СПЕКТРЕ ВОЛЬФРАМОВОЙ ЛАМПЫ

### 1. Источник лучистой мощности

Относительное распределение лучистой мощности измерялось у светоизмерительной электрической лампы накаливания типа № 7 (ОСТ 8273) с конической колбой, мощностью около  $700$  W, предварительно отоженной. Напряжение  $-110$  V—поддерживалось с точностью до  $0,01$  V. Лампа устанавливалась поочередно перед объективной щелью обоих двойных монохроматоров. Плоскость ее нити поворачивалась при этом под некоторым углом к плоскости входной щели, так что со стороны последней не видно промежутков между отдельными отрезками спирали. Изображение нити фокусировалось с помощью линзы на входную щель прибора.

### 2. Измерения распределения лучистой мощности

Измерения лучистой мощности в спектре велись по отношению к ее значению при длине волны  $550$  м $\mu$  через  $10$  м $\mu$ . Общее число измеренных точек было  $30$ , не считая  $550$  м $\mu$ .

Вычисление распределения мощности в спектре ИС

| $\lambda, \text{ мк}$  | $F_{\lambda} = f_0 \cdot c \left[ 1 + \frac{a^2 + c^2}{3} \cdot \beta \right] = f_0 \cdot c \left[ 1 + \frac{a^2 + c^2}{(a+c)^2} \cdot \frac{\beta}{6} \right]$ |      |       |       |       |       |       |      |
|--|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|  | 420   | 440  | 460   | 480   | 500   | 520   | 540   | 550  |
| $c = \frac{0,5}{2} \text{ мк} - \text{в мк}$   | 0,8   | 1,0  | 1,2   | 1,4   | 1,6   | 1,9   | 2,1   | 2,3  |
| $a = \frac{1,3}{2} \text{ мк} - \text{в мк}$   | 2,2   | 2,6  | 3,1   | 3,6   | —     | —     | —     | —    |
| $a = \frac{0,8}{2} \text{ мк} - \text{в мк}$   | —   | —    | —     | —     | 2,2   | 2,6   | 3,0   | 3,4  |
| $c$  | 0,7   | 1,0  | 1,4   | 1,9   | 1,9   | 2,7   | 3,5   | 4,5  |
| $a^2$  | 4,8   | 6,9  | 9,5   | 3,7   | 5,0   | 6,9   | 9,0   | 11,5 |
| $\frac{a^2 + c^2}{3}$  | 1,8   | 2,6  | 3,6   | 5,0   | 2,3   | 3,2   | 4,2   | 5,3  |
| $(a+c) = \Delta\lambda$  | 3,0   | 3,6  | 4,3   | 5,0   | 3,6   | 4,2   | 4,9   | 5,9  |
| $2(a+c)^2$   | 18,0  | 26,0 | 36,8  | 50,0  | 26,0  | 35,2  | 48,0  | 69,2 |
| $F_{\lambda}$  | 3,41  | 8,36 | 16,7  | 28,2  | 8,2   | 43,2  | 62,7  | 85,4 |
| $F_{(\lambda-\Delta\lambda)}$  | —   | 7,35 | 14,5  | 25,1  | 25,1  | 39,9  | 57,4  | 78,0 |
| $F_{(\lambda+\Delta\lambda)}$  | —   | 9,5  | 18,9  | 3,0   | 31,0  | 47,1  | 67,7  | 93,0 |
| $\delta = \frac{F_{(\lambda-\Delta\lambda)} + F_{(\lambda+\Delta\lambda)} - F_{\lambda}}{2}$ | +0,13   | 0,0  | +0,7  | +0,7  | +0,6  | -0,3  | +0,2  | 0,0  |
| $\Delta = \frac{\delta}{2(a+c)^2} \cdot \frac{a^2 + c^2}{3}$                                 | -0,01   | 0,0  | -0,07 | -0,06 | -0,05 | +0,03 | -0,02 | 0,0  |
| $f_{\lambda}$  | 3,41  | 8,35 | 16,7  | 28,1  | 28,1  | 43,2  | 62,7  | 85,4 |
| $f_{\lambda} \cdot D_{\lambda}$  | 9,13  | 18,7 | 31,8  | 45,7  | 45,7  | 49,6  | 75,5  | 91,0 |
| $\frac{f_{\lambda} \cdot D_{\lambda}}{\gamma_{\lambda}}$                                     | 22,3  | 31,2 | 40,9  | 52,2  | 52,2  | 63,9  | 78,1  | 92,2 |

точности по данным измерений с термостолбиком

|  | $F_{\lambda} = f_0 \cdot b \left[ 1 + \frac{\beta(\Delta\lambda)^2}{6} \right] = f_0 \cdot b \left[ 1 + \frac{\beta}{12} \right]$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |
|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|  | 550   | 560   | 580   | 600   | 620   | 640   | 660   | 680   | 700   | 720   |  |
| $2c = \Delta\lambda$ в мк                                | 4,5   | 4,8   | 5,4   | 6,0   | 6,7   | 7,6   | 8,3   | 9,2   | 10,0  | 10,6  |  |
| $F_{\lambda}$  | 100,0   | 114,7 | 147,1 | 175,6 | 214,6 | 261,6 | 328,3 | 421,2 | 506,9 | 583,1 |  |
| $F_{(\lambda-\Delta\lambda)}$                            | 93,5  | 107,5 | 138,2 | 166,8 | 200,8 | 241,4 | 248,4 | 378,0 | 566,0 | —     |  |
| $F_{(\lambda+\Delta\lambda)}$                            | 106,5   | 122,3 | 154,8 | 186,3 | 229,0 | 283,5 | 353,0 | 462,5 | 546,0 | —     |  |
| $\delta$   | 0   | +0,4  | -1,2  | -1,9  | +1,6  | +1,7  | +4,8  | -4,1  | -1,8  | —     |  |
| $\Delta = \frac{\delta}{12}$                             | 0   | -0,03 | +0,10 | +0,16 | -0,13 | -0,14 | -0,40 | +0,34 | +0,15 | —     |  |
| $f_{\lambda}$  | 100,0   | 114,7 | 147,2 | 175,8 | 214,5 | 261,5 | 327,9 | 420,9 | 506,7 | 583,1 |  |
| $f_{\lambda} \cdot D_{\lambda}$                          | 100,0   | 108,5 | 123,3 | 132,0 | 144,8 | 156,2 | 178,0 | 208,0 | 229,1 | 247,8 |  |
| $\frac{f_{\lambda} \cdot D_{\lambda}}{\gamma_{\lambda}}$ | 100,0   | 106,8 | 123,7 | 138,8 | 154,3 | 170,4 | 186,0 | 202,8 | 218,0 | 231,6 |  |



При использовании максимальной чувствительности электрической измерительной установки, какой удалось достигнуть, наименьшие отклонения гальванометра в синей части падают до 3—4 делений. Повышение точности достигалось увеличением числа измерений. Необходимые для перехода к относительной энергии в спектре поправки (на щели, дисперсию, пропускание монохроматора) вводились в средние данные измерений.

Средние значения относительной мощности по измерениям в установках обоих монохроматоров приведены в табл. 3 и на рис. 13.

В этой же таблице (графы 10 и 11) приведены средняя квадратичная и вероятная погрешности определения относительной мощности в спектре источника. Значения их вычислены как:

$$\sigma_{E_{\lambda}} = \sqrt{\sigma_{I_{\lambda}}^2 + \sigma_{D_{\lambda}}^2 + \sigma_{D_{\lambda}}^2},$$

где  $\sigma_{I_{\lambda}}$ ,  $\sigma_{D_{\lambda}}$  и  $\sigma_{D_{\lambda}}$  — средние квадратичные погрешности при измерениях относительной лучистой мощности, прошедшей через монохроматор, его коэффициента пропускания и дисперсии соответственно.

В свою очередь,

$$\sigma_{\epsilon_{\lambda}} = \sqrt{\sigma_{\epsilon_{\parallel}}^2 + k^2 \sigma_{\epsilon_{\perp}}^2},$$

где  $\sigma_{\epsilon_{\parallel}}$  и  $\sigma_{\epsilon_{\perp}}$  — средние квадратичные ошибки измерения для двух плоскостей поляризации коэффициентов пропускания монохроматора, а  $k$  — коэффициент, определяющий соотношение этих коэффициентов пропускания.

На основании значения вероятной погрешности результата и с учетом условий измерений в различных областях спектра установлены веса для относительных значений мощности в отдельных точках спектра. Наибольший вес придан измерениям в средней части спектра, где сравниваемые излучения относительно мало различаются между собой как по абсолютному значению, так и по положению в спектре.

Как видно из приведенных кривых на рис. 13 и данных табл. 3, отклонения в излучении лампы от излучения черного тела становятся заметными на краях видимого спектра, начиная от 480 м $\mu$  и ниже и 680 м $\mu$  и выше. Обращает на себя внимание характер полученных отклонений. К оси абсцисс кривая обращена выпуклостью, в то время как для чистой поверхности вольфрама, по литературным данным о многочисленных измерениях коэффициентов излучения, наблюдается обратная картина: яркость имеет повышенные значения в средней части спектра, т. е. кривая распределения мощности к оси абсцисс обращена вогнутостью. Это несоответствие с результатом настоящих исследований, в свою очередь, говорит в пользу применения метода измерения распределения энергии по сравнению со способом подбора цвета.

Характер излучения открытой поверхности вольфрамовой нити, определенным образом отожженной, после ее помещения в лампу

подвергается значительным изменениям в силу ряда условий:  
 1) свивание нити в спираль „чернит“ излучение; 2) распределение температуры в спиральной нити иное, чем в прямой вследствие неодинаковых условий охлаждения различных витков спирали

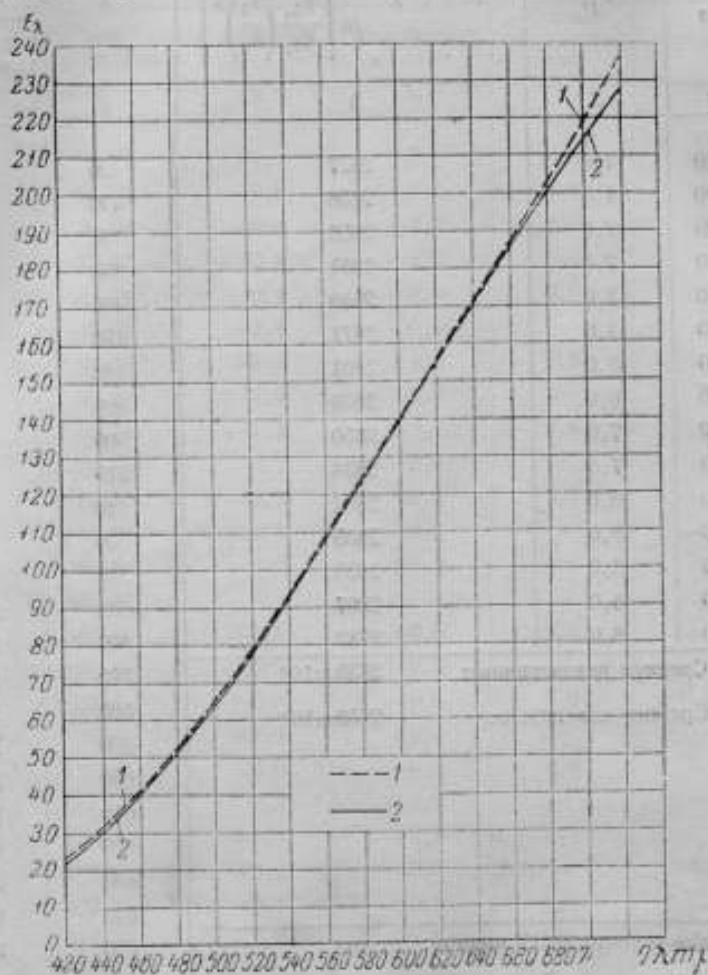


Рис. 13. Распределение лучистой мощности в видимом спектре лампы № 7.

1 — вольфрамовая лампа № 7; 2 — черное тело при 2500°K.

в зависимости от их взаимного расположения; 3) селективным поглощением может обладать стекло колбы; 4) налет на колбе от распыления вольфрама обладает значительной селективностью и в поглощении и в рассеянии. Отсюда вытекает ненадежность расчетного определения относительной лучистой мощности в спектре на основании только коэффициентов излучения, даже столь хорошо изученных, как у вольфрама.

## Значения относительной

## тепловой мощности

| $\lambda_2 - \lambda_1$ | $\rho$ | $T_c = \frac{c_2}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\ln \left[ \frac{E_{\lambda_2} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5}{E_{\lambda_1} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5} \right]}$ | $\lambda$<br>нм | Распределение       |        | левые лучистой мощности в спектре |                           | Отклонение вычисленных значений от измеренных, % |                          | Погрешности измерения, % |           |
|-------------------------|--------|--|-----------------|---------------------|--------|-----------------------------------|---------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-----------|
|                         |        |  |                 | измеренные значения | 5      | вычисленные значения              |                           | $T = 2844^\circ\text{K}$                         | $T = 2833^\circ\text{K}$ | средняя квадратичная     | вероятная |
|                         |        |  |                 |                     |        | $T = 2844^\circ\text{K}$          | $T = 2833^\circ\text{K}$  |  |                          |                          |           |
| 420—580                 | 1,0    | 2827   | 420             | 22,3                | 22,64  | 22,19                             | +1,7                      | -0,5   | 8,5                      | 5,7                      |           |
| 430—590                 | 1,5    | 2858   | 430             | 26,7                | 26,59  | 26,33                             | -0,6                      | -1,4   | 6,4                      | 4,3                      |           |
| 440—600                 | 2,0    | 2852   | 440             | 31,2                | 30,95  | 30,68                             | -0,8                      | -1,7   | 5,0                      | 3,4                      |           |
| 450—610                 | 2,5    | 2851   | 450             | 36,0                | 35,69  | 35,41                             | -0,9                      | -1,6   | —                        | —                        |           |
| 460—620                 | 3,0    | 2840   | 460             | 40,6                | 40,75  | 40,48                             | +0,4                      | -0,3   | 4,0                      | 2,7                      |           |
| 470—630                 | 4,0    | 2871   | 470             | 43,3                | 46,18  | 45,93                             | -2,4                      | -2,9   | —                        | —                        |           |
| 480—640                 | 5,0    | 2851   | 480             | 52,4                | 51,98  | 51,74                             | -0,8                      | -1,3   | 2,2                      | 1,5                      |           |
| 490—650                 | 6,0    | 2859   | 490             | 59,2                | 58,05  | 57,84                             | -1,9                      | -2,3   | —                        | —                        |           |
| 500—660                 | 7,0    | 2850   | 500             | 65,2                | 64,46  | 64,28                             | -1,1                      | -1,4   | 2,6                      | 1,8                      |           |
| 510—670                 | 7,5    | 2834   | 510             | 71,2                | 71,42  | 70,97                             | -0,1                      | -0,3   | —                        | —                        |           |
| 520—680                 | 8,0    | 2832   | 520             | 78,2                | 78,04  | 77,94                             | -0,3                      | -0,3   | 2,1                      | 1,4                      |           |
| 530—690                 | 8,0    | 2835   | 530             | 85,9                | 85,17  | 85,13                             | -0,9                      | -0,9   | —                        | —                        |           |
| 540—700                 | 8,0    | 2833   | 540             | 92,5                | 92,49  | 92,52                             | -0,0                      | +0,0   | 0,7                      | 0,5                      |           |
| 550—710                 | 8,0    | 2807   | 550             | 100,0               | 100,00 | 100,00                            | —                         | —  | —                        | —                        |           |
| 560—720                 | 8,0    | 2782   | 560             | 106,9               | 107,62 | 107,80                            | +0,6                      | +0,8   | 2,0                      | 1,3                      |           |
| Среднее невзвешенное    |        | $2839 \pm 16^\circ$  | 570             | 116,0               | 115,32 | 115,59                            | -0,6                      | -0,4   | —                        | —                        |           |
| Среднее взвешенное      |        | $2833 \pm 16^\circ$  | 580             | 123,5               | 123,09 | 123,45                            | -0,3                      | -0,0   | 2,0                      | 1,3                      |           |
|                         |        |  | 590             | 129,6               | 130,95 | 130,65                            | +1,0                      | +0,7   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 600             | 138,8               | 138,77 | 139,36                            | -0,0                      | +0,5   | 1,8                      | 1,2                      |           |
|                         |        |  | 610             | 147,0               | 146,66 | 147,34                            | -0,2                      | +0,2   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 620             | 154,2               | 154,42 | 155,24                            | +0,1                      | +0,7   | 2,4                      | 1,6                      |           |
|                         |        |  | 630             | 161,7               | 162,07 | 163,09                            | +0,2                      | +0,8   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 640             | 170,0               | 169,82 | 170,85                            | -0,1                      | +0,5   | 1,8                      | 1,2                      |           |
|                         |        |  | 650             | 178,4               | 177,38 | 178,60                            | -0,6                      | +0,1   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 660             | 186,1               | 184,86 | 186,40                            | -0,7                      | +0,1   | 2,2                      | 1,5                      |           |
|                         |        |  | 670             | 194,0               | 192,13 | 193,63                            | -1,0                      | -0,2   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 680             | 201,7               | 199,21 | 200,90                            | -1,2                      | -0,4   | 2,4                      | 1,6                      |           |
|                         |        |  | 690             | 209,5               | 206,16 | 207,99                            | -1,6                      | -0,7   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 700             | 216,4               | 212,96 | 214,91                            | -1,4                      | -0,7   | 1,6                      | 1,1                      |           |
|                         |        |  | 710             | 225,5               | 219,53 | 221,89                            | -2,7                      | -1,6   | —                        | —                        |           |
|                         |        |  | 720             | 234,6               | 225,89 | 228,19                            | -3,7                      | -2,7   | 1,4                      | 0,9                      |           |
|                         |        |  |                 |                     |        |                                   | Среднее $\pm 0,8$<br>-0,6 | $\pm 0,9$<br>-0,6                                |                          |                          |           |

В связи с этим заключением интересно сопоставить данные настоящей работы с результатами некоторых других исследований. На рис. 14 излучение черного тела принято за единицу по всему спектру. Верхняя кривая характеризует отклонение от черного тела излучения измеренной в настоящей работе вольфрамовой лампы. Кривые нижней части рисунка являются результатами типовых испытаний, обработанных автором по данным распределения энергии в спектре для нескольких различных источников света, приведенным в работах Форсайта, Барнеса и Адамса [14].

Как видно из этих кривых, отклонения в излучении отдельных источников от излучения черного тела значительны и неоднородны по характеру. Лишь за пределами видимого спектра все кривые идут ниже прямой черного тела; количественно и это явление неодинаково для различных источников.

### 3. Расчет цветовой температуры электрической лампы накаливания

По данным относительного распределения мощности в спектре вольфрамовой лампы можно перейти к цвету излучения и к цветовой температуре этой последней. Переход этот расчетным путем совершается различно в зависимости от того, которое из определений цветовой температуры положено в его основу. Между результатами этих расчетов обнаруживаются характерные расхождения.

а) Формула Вина<sup>1</sup>  $E_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_c}}$  является исходной в рас-

четах цветовой температуры по совпадению распределения мощности как для каких-либо двух точек, так и по всей области видимого спектра. Последний случай относится к настоящей работе. При этом постоянную  $C_1$  в формуле Вина следует заменить через некоторый (неизвестный) коэффициент  $k$  в связи с тем, что определены лишь относительные значения мощности по спектру.

Две неизвестных величины ( $T_c$  и  $k$ ) связаны между собой, согласно числу экспериментальных точек, тридцатью уравнениями. Допустимым упрощением является преобразование последних в пятнадцать уравнений с одним неизвестным.

Равноценность этих уравнений, если в первом приближении не принимать во внимание весов отдельных измерений, обеспечивается выбором входящих в них точек на равных промежутках друг от друга. В качестве такого расстояния выбрана половина измеренного спектрального участка, т. е. при значениях относительной мощности, полученных в области 420—720 м $\mu$  через

<sup>1</sup> Для видимого спектра и в пределах температур до 3000° К можно пользоваться с целью упрощения расчетов уравнением Вина, а не Планка. Вносимая этим упрощением ошибка не превышает в указанных пределах температур 0,3%, что лежит за пределами точности измерений.

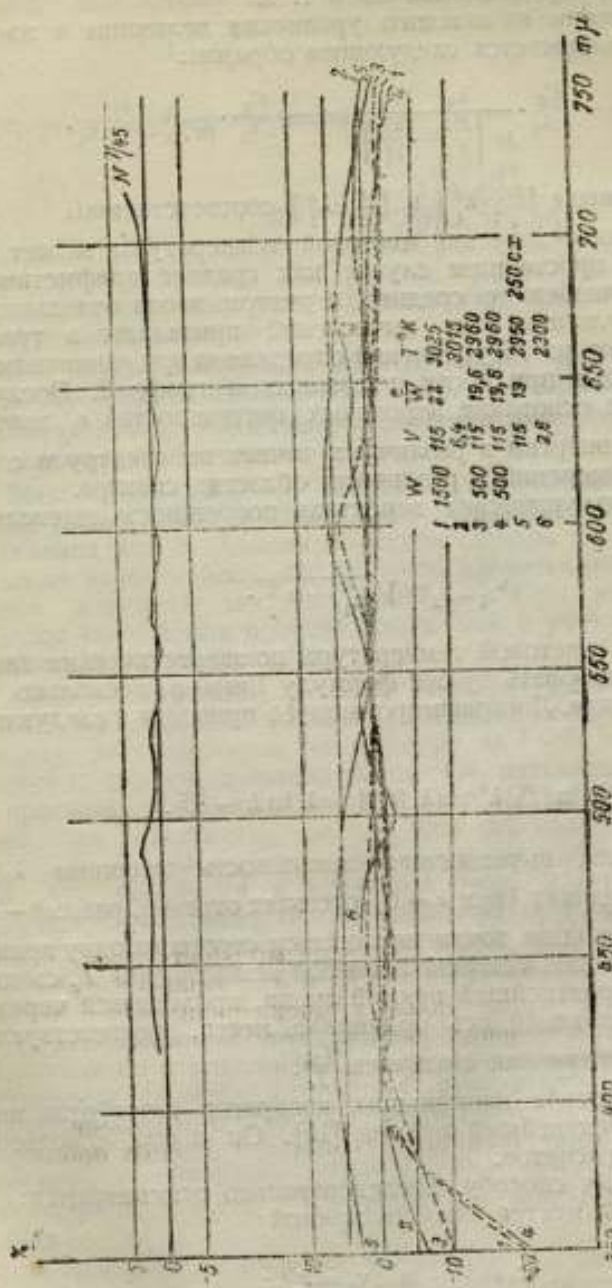


Рис. 14. Отклонения плавления вольтфрамозных ламп от излучения черного тела.  
По оси абсцисс отложены значения величины

$$\left[ \left( \frac{E_A}{F_{550}} \right) w : \left( \frac{E_x}{F_{550}} \right) \text{ ч. т.} \right] - \left( \frac{E_A}{F_{550}} \right) \text{ ч. т.}, \text{ в процентах.}$$

каждые 10 нм, уравнения составляются для следующих пар точек: 420—580 нм, 430—590 нм и т. д.

По исключению из каждого уравнения величины  $k$  цветовая температура выражается следующим образом:<sup>1</sup>

$$T_c = -\frac{C_2}{\lambda_1 \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\ln \left[ \frac{E_{\lambda_1} \cdot \lambda_1^5}{E_{\lambda_2} \cdot \lambda_2^5} \right]} = -\frac{C_2}{\lambda_1 \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\ln A_1 - \ln A_2}$$

где  $A_1$  и  $A_2$  равны  $[E_{\lambda_1} \cdot \lambda_1^5]$  и  $[E_{\lambda_2} \cdot \lambda_2^5]$  соответственно.

Далее, среднее значение цветовой температуры может быть определено в простейшем случае как среднее арифметическое или же как взвешенное среднее, с учетом весов отдельных измерений. Результаты этих вычислений приведены в графе 3 табл. 3. Среднее из 15 уравнений определено при единичном весе всех измерений и при весах, указанных в графе 2. Последние установлены на основании вероятных погрешностей  $\varepsilon_{\lambda_i}$  значений относительной энергии в различных точках по спектру и с учетом условий измерений в различных областях спектра.

Для каждого уравнения вероятная погрешность вычисляется как

$$\varepsilon_{\lambda_1 - \lambda_2} = \sqrt{\varepsilon_{\lambda_1}^2 + \varepsilon_{\lambda_2}^2}$$

Для расчета цветовой температуры по энергетическим данным возможно использовать ту же формулу Вина в несколько преобразованном виде. Логарифмирование ее приводит к следующему выражению:

$$\lambda_i \ln (E_{\lambda_i} \lambda_i^5) = \lambda_i \ln A_i = \lambda_i \ln k - \frac{C_2}{T_c}$$

Прямая линия, выражающая зависимость величины  $\lambda_i \ln A_i$  от  $\lambda_i$ , на оси ординат (при  $\lambda = 0$ ) отсекает отрезок, равный  $-\frac{C_2}{T_c}$ .

Экспериментальные точки не ложатся строго на одну прямую. Поэтому нахождение искомой цветовой температуры  $T_c$  сводится к отысканию вероятнейшей прямой линии, проходящей через эти точки и пересекающей ось ординат в месте, соответствующем вероятнейшему значению величины  $\frac{C_2}{T_c}$ .

На основе способа наименьших квадратов разработан метод определения вероятнейшей прямой [15]. Он и был использован для настоящих расчетов.

Согласно этому способу, последовательно отыскиваются:

1) координаты центра тяжести прямой

$$x_0 = \frac{[x]}{n} \quad \text{и} \quad y_0 = \frac{[y]}{n};$$

<sup>1</sup> Так же, как при определении по „красно-синему“ отношению.

2) координаты экспериментальных точек, отнесенные к центру тяжести как новому центру системы координат,

$$x'_i = x_i - x_0 \quad \text{и} \quad y'_i = y_i - y_0;$$

3) угол наклона прямой  $\alpha$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2[x'_i y'_i]}{[(x'_i)^2] - [(y'_i)^2]} \quad (5)$$

Приведенные выражения соответствуют единичным весам всех экспериментальных точек.

Для случая настоящей работы, когда неравные веса приписывались лишь величинам  $\lambda \ln(E_\lambda \lambda^5)$ , т. е. ординатам экспериментальных точек, расчетные выражения оказалось необходимым несколько преобразовать.

Вычисления цветовой температуры, основанные на формуле Вина, велись обоими способами: решением указанных выше 15 уравнений для отдельных участков спектра и посредством определения вероятнейшей прямой (что является по существу совместным решением тех же уравнений). При этом для каждого способа вычисления производились как с учетом весов измерений, так и без введения их.

Средние значения цветовой температуры в обоих случаях и при обоих способах расчета совпадают полностью (взвешенное среднее дает цветовую температуру на 6—8° ниже, чем невзвешенное). Но при большем изяществе математического решения и простоте выкладок способ отыскания вероятнейшей прямой имеет тот недостаток, что при его использовании оказываются скрытыми колебания отдельных экспериментальных точек. Между тем, эти колебания в известной мере характеризуют данное излучение, поскольку они обусловлены не только погрешностью измерений, но и неполным совпадением излучений исследуемого источника (т. е. совокупности вольфрамовой нити и стеклянной колбы) и черного тела.

Расчет цветовой температуры, выполненный для разных промежутков по отношениям спектральных яркостей двух длин волн, показывает (помимо случайных отклонений, более или менее значительных) отчетливое снижение цветовой температуры с перемещением взятого интервала в красную часть спектра (приблизительно от 2860° до 2780° K). Это снижение соответствует повышенной яркости у измерявшейся лампы в красной области спектра. ?

б) Неполное совпадение излучения для вольфрамовой лампы и черного тела служит также причиной некоторого несовпадения в значениях цветовой температуры по данным вышеприведенных вычислений и тем, что дает способ уравнивания цвета.

Расчетным путем проверка эта произведена, во-первых, определением длины волны центра тяжести для кривой видности излучения вольфрамовой лампы:

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{450}^{720} \lambda \cdot E_{\lambda} \cdot v_{\lambda} d\lambda}{\sum_{450}^{720} E_{\lambda} \cdot v_{\lambda} d\lambda};$$

цветовая температура, определенная этим способом, равна 2846° К; во-вторых, цвет излучения вольфрамовой лампы по измеренным значениям относительной мощности в спектре вычислен с помощью

трехцветных коэффициентов ( $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ ). Полученная точка, несколько смещенная относительно кривой планковского излучения, соответствует приблизительно цветовой температуре 2853° К.

В обоих последних случаях вычисления температуры по цвету и по длине волны центра тяжести еще не учтены веса отдельных измерений. С учетом их—по аналогии с предшествующими расчетами—полученные значения цветовой температуры (2846° и 2853° К) снижаются приблизительно на 0,25%, т. е. на 6°. Это дает значения 2840° и 2847° К—для сравнения с цветовой температурой 2832° К, полученной непосредственным расчетом из относительного распределения мощности в спектре (т. е. без учета спектральной чувствительности глаза).

Цветовая температура для исследовавшейся лампы была определена по способу уравнивания цвета также и опытным путем. Измерения эти производились при открытых и закрытых крючках, поддерживающих нить. Получены цветовые температуры 2841° и 2848° К соответственно.

Однако при измерениях относительной энергии часть излучения от нитей вблизи крючков закрывалась входной щелью монохроматора и, следовательно, не достигала приемника лучистой энергии. Можно поэтому предположить, что выполненные измерения соответствуют некоторому среднему положению нити (в отношении использования излучения от охлажденных частей) и средней цветовой температуре—около 2844° К. Этот результат хорошо совпадает с данными, полученными из расчета цвета излучения или при учете кривой видности. Расхождение с значениями цветовой температуры, вычисленными по относительной мощности, остается заметным—порядка  $\approx 5-6^{\circ}$ ,—хотя и лежит на пределе точности измерений обоими способами.

В графах 6—9 табл. 3 приведены расчетные данные для полного излучателя при температурах 2844° и 2832° К и отклонения от них измеренных значений мощности. Отклонения эти по абсолютной величине лежат в пределах точности измерений, но носят систематический характер отрицательной поправки, растущей к краям видимого спектра (от 480 и 680 м $\mu$ ).

Изложенное позволяет:



1) считать полученные результаты совпадающими с существующей во ВНИИМ шкалой цветовых температур в пределах  $\approx 5^\circ$ ; при этом для исследованной лампы принимается значение цветовой температуры  $2845 \pm 5^\circ \text{K}$ ;

2) применяя указанную лампу как образцовую, с известным распределением мощности, употреблять для дальнейшего практического приложения найденные значения относительной мощности в спектре, считая их установленными с точностью около  $\pm 0,5\%$  (что приблизительно соответствует  $\pm 5^\circ$ ).

## VI. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В СПЕКТРЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЛАМП

Установление для описанной выше лампы относительного распределения лучистой мощности в спектре позволяет применить эту лампу в качестве образцовой для сравнительных исследований по спектру излучения различных источников. В этих упрощенных измерениях отпадает необходимость определения коэффициентов пропускания двойного монохроматора, а также измерений с термостолбиком — двух основных и наиболее трудных для выполнения участков работы.

Измерения распределения мощности по спектру ведутся посредством фотоэлемента и для исследуемого и для образцового источников света. Спектральная чувствительность фотоэлемента естественно здесь исключается.

Наибольшую трудность в этих измерениях представляет вполне одинаковое для обоих случаев заполнение световым пучком оптической системы монохроматора.

Испытание различных способов освещения щели прибора привело к выбору следующего.

Перед входной щелью монохроматора *M* (рис. 15), под углом около  $45^\circ$ , располагается рассеивающая пластинка из сернио-кислого бария *П*. Пластинка поочередно освещается исследуемым и образцовым источником света *Л*, при каждом из которых производятся относительные измерения для выбранных участков спектра.

Неизменное расположение пластинки по отношению к щели монохроматора обеспечивает для всех случаев одинаковое заполнение пучком света его оптической системы.

Возможность применения для этих сравнительных измерений фотоэлемента *ФЭ* по указанным выше причинам (стр. 21) повышает точность производимых сличений.

Основным и единственным недостатком данного способа является резкое снижение яркости монохроматического изображения в выходной щели. Однако, располагая достаточной чувствительностью свето- и электроизмерительной установки для измерения фототоков, возможно снизить значение этого недостатка.

Кроме того, при взаимном сличении одноволновых источников света с плавными изменениями в распределении мощности по спектру, допустимо значительное (до 20—30 тп) расширение щелей прибора.

Этим способом были произведены сличения с образцовой лампой (описанной выше) трех ламп с цветовой температурой  $2842^{\circ}\text{K}$  и четырех—с цветовой температурой  $2355^{\circ}\text{K}$ .

Для ламп первой группы можно считать, что точность при передаче к ним значений распределения мощности в спектре от образцового источника практически не понизилась. Вторая группа ламп имеет существенно отличное распределение мощности в спектре, почему и сличения ее с образцовым источником выполнены с некоторым (хотя и незначительным) понижением точности.

Измерения выполнялись в обоих случаях сличений для ограниченного числа точек в спектре, а именно восьми. Это число оказывается вполне достаточным для получения указанной выше точности измерений.

Результаты проведенных сличений отчетливо подтвердили недостаточность для оценки спектрального состава излучения

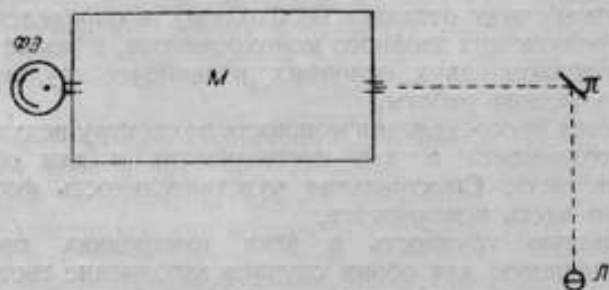


Рис. 15. Схематическое изображение измерительной установки для сравнительных измерений источников света.

определения цветовой температуры источника только на основании его цвета. Например, одна из ламп второй группы—с цилиндрической колбой, имеющая на поверхности стекла очень значительный налет расплывшегося вольфрама,—обнаружила заметное отклонение от излучения черного тела.

## Выводы

1. Основная задача настоящей работы по исследованию метода измерений относительного распределения мощности в спектре была поставлена с целью установить возможность перехода к указанному методу как основному для характеристики излучения. Такой переход необходим для дальнейшего повышения точности, достигшей своего предела в способе уравнивания цвета, но возможен лишь при условии, что точность энергетических измерений в настоящее время не ниже точности других способов и может быть в дальнейшем повышена.

2. Первая половина этого условия доказана на опыте: т. е. установлено, что точность измерений относительного распределе-

ния мощности — одного порядка с точностью субъективного способа уравнивания цвета, притом для наилучших условий последнего (под таковыми подразумеваются случаи сличения источников, близких по спектральному составу излучения). С другой стороны, возможно наметить пути к дальнейшему повышению точности способа измерений относительной мощности.

3. Проведенными исследованиями установлено, что точность измерения относительной мощности в спектре источника зависит в основном от двух величин: точности определения коэффициента пропускания двойного монохроматора и точности непосредственно энергетических измерений с помощью термостолбика.

В отношении коэффициента пропускания — дальнейшее повышение точности, вероятно, может быть достигнуто применением двойных монохроматоров со спаренным перемещением обеих призм прибора, что повысит точность установки длины волны. Последнее особенно существенно для синей части спектра, где коэффициент пропускания для стекла значительно меняется.

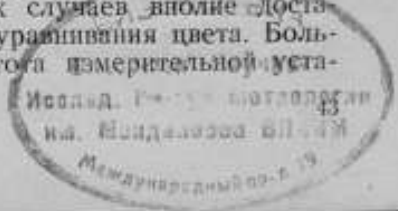
В отношении энергетических измерений повышение точности можно ожидать от применения температурной компенсации посредством вспомогательной термопары. Такая компенсация устранит непостоянство нуля гальванометра, зависящее от скорости изменения окружающей температуры и отдельных мгновенных ее колебаний. Устойчивое положение нуля позволит применить и большее усиление термоэлемента, которое при недостаточном постоянстве этого положения в значительной мере не имеет смысла. Остается также всегда открытой возможность получения новых приемников лучистой энергии, превышающих по чувствительности имеющиеся в настоящее время (например, в литературе имеются указания о разработке новых видов высокочувствительных болометров и вакуумных термопар).

Следовательно, если в настоящее время вполне возможно получить точность энергетических измерений одного порядка со способом уравнивания цвета (для наилучших условий последнего), то в будущем ее можно превзойти.

4. Сравнительные измерения распределения мощности по спектру двух источников света, выполняемые, например, с помощью фотозлемента, очевидно, могут обладать достаточно высокой точностью.

5. Метод измерения относительной мощности в спектре, даже для сравнительных измерений, но при большом числе точек, — довольно сложен. Ограничением для его применения могут являться также недостаточная мощность измеряемого источника света, вид и размеры его тела накала. В отношении первой — дальнейшее повышение чувствительности метода расширит его возможности. Что касается тела накала, то, например, в случае тонких и длинных нитей накала использование при измерениях излучения от всей нити может оказаться затруднительным.

Безусловно, что в ряде практических случаев вполне достаточно точной оказывается точность способа уравнивания цвета. Большим преимуществом его остается простота измерительной уста-



новки, самих измерений и расчетов. Для многих случаев практики этот способ надолго сохранит свое значение.

Настоящая работа выполнена при частичном руководстве проф. П. М. Тиходева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Иванов, Электрические источники света, 1938.
2. Б. А. Остроумов, О современных объективных методах измерения лучистой энергии, „Сборник трудов по светотехнике“, 1938, стр. 80.
3. W. E. Forsythe and A. G. Worthing, The properties of tungsten and the characteristics of tungsten lamps, „Astrophysical Journal“, 1925, LXI, p. 146.
4. П. М. Тиходев, Световые измерения, 1936.
5. С. Э. Фриш, Техника спектроскопии, 1936.
6. P. H. Van Cittert, La theorie du monochromateur double, „Rev. d'Opt.“, 1926, p. 393.
7. G. Terrien, Etude experimentale d'un monochromateur double, „Communications des laboratoires de l'Inst. d'Optique“, 1945.
8. М. М. Гуревич и Е. К. Пудейко, Определение спектральной чувствительности фотоэлементов, „Ж. Т. Ф.“, 1934, стр. 748.
9. А. Н. Бойко, Современные методы и приборы для измерения лучистой энергии, „Сборник трудов по светотехнике“, Ак. Наук СССР, 1938, стр. 69—77.
10. О. Д. Хвольсон, О современном состоянии актинометрии, 1892.
11. R. P. Teale, A physical photometer, „Jour. of Research“, vol. 27, N 3, 1941, p. 217.
12. Pashen, „Annalen der Physik und Chemie“, B. 60, 1897, s. 712.
13. G. Ribaud et J. Peuchés, Correction dues aux largeurs des fentes dans les mesures au spectrophotometre, „Revue d'Optique“, 1932, p. 241.
14. W. E. Forsythe and E. Q. Adams, Radiating characteristics of tungsten and tungsten lamps, JOSA, v. 33, N 2, 1945, p. 108.
15. Д. И. Менделеев, Опытное исследование колебания весов, Отдельный оттиск, 1898 г., стр. 11—124.

В. Е. КАРТАШЕВСКАЯ

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЭТАЛОНА-КОПИИ НОВОГО ОСНОВНОГО СВЕТОВОГО ЭТАЛОНА ДЛЯ ЕДИНИЦЫ СВЕТОВОГО ПОТОКА

### 1. Цель работы

Настоящая работа была поставлена в связи с переходом, согласно международным соглашениям, с 1 января 1948 г. к новым световым единицам. Окончание работы по установлению нового светового эталона в виде полного излучателя,<sup>1</sup> воспроизводящего прежде всего единицу яркости и вместе с тем единицу светового потока в очень ограниченном телесном угле, позволяет совершить переход от этой последней к такой единице светового потока — новому люмену, которая испускается по всем направлениям, как это требуется для практики. Рабочие температуры разнообразных вольфрамовых электрических ламп накаливания, изготовляемых ламповыми заводами, лежат в пределах 2000—3000° К. Новые современные источники света (люминесцентные лампы) имеют цветовые температуры значительно более высокие. В деле установления рабочих световых эталонов должно быть предусмотрено создание отдельных ламп с различными цветовыми температурами.

Постановление Международного консультативного комитета по фотометрии устанавливает для эталонов светового потока, применяемых для международных сравнений, две цветовые температуры — 2355° и 2800° К. Эти цветовые температуры в значительной мере удовлетворяют запросам практики, обеспечивая в довольно широких пределах одноцветные измерения и пустотных и газополных ламп.

Установление же для эталонных и образцовых ламп определенных значений цветовой температуры имеет преимущество увеличения точности световых измерений и введения некоторого единообразия в их обстановку. Как известно, условия разноцветных измерений в большой мере влияют на их конечный результат. Для получения однозначных и сравнимых с другими измерениями данных необходимо строгое выполнение ряда ограничений, как, например, определенные размеры поля, уровень его яркости, состав наблюдателей (в отношении их спектральной чувствительности) и др. Облегчением же в создании единообразных

<sup>1</sup> См. П. М. Тиходеев, Новый государственный световой эталон СССР. Изд. АН ССР, 1949.

условий измерений в повседневной практике является применение образцовых ламп со вполне определенными цветовыми температурами.

Соответственно сказанному, настоящая работа состояла из двух разделов: установления пустотной части эталона-копии для основного светового эталона, горящей при цветовой температуре 2355° К, и установления газополной части эталона-копии того же эталона, работающей при цветовой температуре 2800° К.

Первая часть составлена из 12 светоизмерительных ламп типа № 9,<sup>1</sup> вторая—из того же числа ламп типа № 12<sup>1</sup> Московского электролампового завода.

## 2. Отбор ламп

Лампы, вошедшие в состав эталонных групп, отбирались после предварительного отжига в течение 50—60 час. За это время устойчивость ламп проверялась неоднократно по силе тока при определенном значении напряжения. Были отобраны, как наиболее устойчивые,<sup>2</sup> из 24 ламп типа № 9—18 ламп и из 18 ламп типа № 12—15 ламп.

Для всех ламп отдельными измерениями были подобраны указанные выше цветовые температуры, т. е. определены соответствующие им значения напряжения.

## 3. Описание установки

Основной измерительной установкой для перехода к единице светового потока по всем направлениям—от единицы освещенности, полученной от рабочего для нее эталона (в свою очередь, непосредственно сличенного с основным),—служил распределительный фотометр. С его помощью измеряется распределение силы света источника в продольной плоскости, проходящей через ось симметрии лампы, при одновременном вращении последней вокруг этой оси. Вычисления световых потоков внутри отдельных телесных углов, определенных согласно выбранным направлениям измерений силы света, позволяют найти по результатам произведенных измерений общий световой поток лампы.

Схема распределительного фотометра конструкции лаборатории представлена на рис. 1.

Измеряемая лампа  $S_1$  (установленная цоколем вверх в особом держателе, который приводится во вращение от мотора постоянного тока) освещает испытательную сернибариевую пластинку  $A_1$ . Лампа сравнения  $S_2$ , свободно передвигающаяся по светомерной скамье  $B$ , освещает пластинку сравнения  $A_2$ . Поля сравнения, образованные пластинками  $A_1$  и  $A_2$ , приводятся в соприкосновение в плоскости фотометрического кубика  $K$  с помощью вспомогательных оптических частей: призмы полного внутреннего отражения

<sup>1</sup> ОСТ 8273.

<sup>2</sup> Наибольшие колебания в силе тока отдельных ламп за время их испытаний не превышают  $\pm 0,05$  —  $\pm 0,06\%$  и для пустотных и для газополных ламп.

$P_1$  и  $P_2$  и собирающих линз  $L_1$  и  $L_2$ . Призмы  $P_1$  и  $P_2$  отклоняют в пучком направлении лучи света от испытательных пластинок, линзы  $L_1$  и  $L_2$  дают в плоскости фотометрического кубика увеличенные изображения обеих полей. Последнее необходимо в целях возможного уменьшения размеров обеих пластинок и увеличения расстояния между пластинкой  $A_1$  и источником  $S_1$ .

Пластинка  $A_1$  расположена на расстоянии 2 м от светового центра источника  $S_1$  и может поворачиваться вокруг него в пределах полного оборота в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии лампы. При этом ось вращения испытательной пластинок  $A_1$  перпендикулярна к оси симметрии лампы и к направлению измеряемой силы света.

Размер поворотного плеча, на котором закреплена пластинка  $A_1$ , обуславливает расположение фотометрического кубика (а также и светового центра источника  $S_1$ ) не в одной горизонтальной плоскости с пластинкой  $A_2$  и лампой сравнения  $S_2$ . Следствием этого является наклонное расположение кубика и полей сравнения относительно вертикальной оси его симметрии.

В фотометрической головке применен контрастный кубик небольших размеров: угловой размер поля около  $4^\circ$ .

Перемещение лампы сравнения по скамье производится посредством передачи, рукоятка которой находится у фотометра, вблизи наблюдателя.

Правильное расположение распределительного фотометра достигалось посредством его установочных винтов и проверялось следующим образом: 1) по отсутствию смещения отвеса, опущенного из центра пластинок  $A_1$  при установке ее в два крайние положения—нижнее ( $0^\circ$ ) и верхнее ( $180^\circ$ ); 2) по вертикальности края пластинок  $A_1$  при установке ее в положения  $90^\circ$  и  $270^\circ$ .

Правильное расположение призмы  $P_1$  и линзы  $L_1$  проверялось по отсутствию или по незначительности смещения наблюдаемого через кубик  $K$  участка поверхности пластинок  $A_1$  при различных положениях последней.

Кроме того, кубик  $K$ , призма  $P_1$  и линза  $L_1$  центрированы относительно двух взаимно перпендикулярных осей, из которых вертикальная является осью симметрии лампы, а горизонтальная—

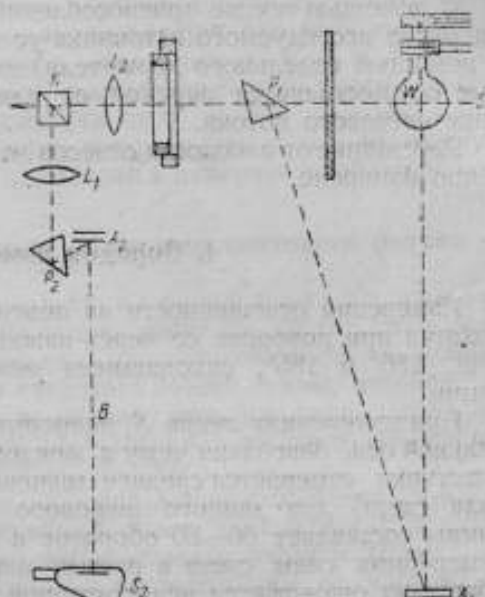


Рис. 1.

той осью, вокруг которой поворачивается пластинка  $A_1$ . Первая из указанных линий при установке пластинки  $A_1$  в нулевое положение проходит через ее середину и для последующих установок лампы отмечена двумя наглухо закрепленными отвесами, в плоскость которых вводится световой центр источника. Правильное расположение последнего по высоте и относительно середины испытательной пластинки  $A_1$  устанавливается с помощью закрепленного наглухо прицела. Последний наведен на точку пересечения упомянутых выше осей: горизонтальной, выходящей из центра кубика, и вертикальной, проходящей через центр пластинки  $A_1$  в ее нижнем положении.

С помощью тех же приспособлений—двух отвесов и прицела—на место исследуемого источника устанавливаются (цоколем вниз, с помощью отдельного держателя) эталонные лампы, через которые осуществляется переход от единицы освещенности к единице светового потока.

Расстояние от плоскости отвесов до испытательной пластинки  $A_1$  точно измерено.

#### 4. Порядок измерений

Измерения освещенности на поверхности пластинки  $A_1$  производятся при повороте ее через каждые  $5^\circ$ , исключая три точки— $175^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $185^\circ$ , находящиеся непосредственно над цоколем лампы.

При измерениях лампа  $S_1$  непрерывно вращается вокруг вертикальной оси, благодаря чему в каждом установленном положении пластинки измеряется среднее значение освещенности (и средняя сила света) для данного шарового пояса. Скорость вращения лампы составляет 60—80 оборотов в минуту. При значительных изменениях силы света в разных направлениях такая скорость вращения оказывается недостаточной для того, чтобы сгладить эти изменения. Результатом является мигание яркости поля сравнения, затрудняющее условия фотометрирования. В случаях особенно сильного мигания измерения производились для данного положения пластинки с неподвижной лампой при нескольких поворотах ее вокруг вертикальной оси.

Распределение силы света во всех направлениях измерялось у данной лампы двумя наблюдателями поочередно.<sup>1</sup> Время непрерывного горения лампы составляло при этом 2—3 часа. В течение дня обычно измерялось полностью две лампы. Сила света лампы сравнения определялась в начале и в конце дня по четырем (сменным) эталонам силы света. Изменение силы света лампы сравнения на протяжении 6—7 час. ее горения учитывалось, таким образом, непосредственно при расчетах светового потока. Впрочем, численно оно никогда не превышало  $\pm 0,1$ — $\pm 0,2\%$  (включая

<sup>1</sup> При расхождении между ними проводились дополнительные измерения третьим наблюдателем.



погрешность измерений). Изменение светового потока измеряемой лампы учитывалось повторным определением в конце измерений начальной силы света.

Устойчивость лампы во время работы проверялась также по силе тока.

### 5. Порядок вычислений

Вычисления светового потока велись по общеизвестному способу угловых коэффициентов.<sup>1</sup> Измеренное значение средней освещенности на данном шаровом поясе умножается на площадь этого пояса. Последняя равна произведению телесного угла, который опирается на этот пояс, на квадрат его радиуса. Сумма вычисленных световых потоков отдельных поясов в пределах  $0-180^\circ$  (или  $180-360^\circ$ ) дает полный световой поток лампы. Суммирование по всей окружности от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  повышает точность определения светового потока, устраняя возможную погрешность из-за неполной симметрии в измерительной установке.

### 6. Поправки к измеренным значениям светового потока

а) Поправка на световой поток у цоколя лампы. В вычисленное, как указано выше, значение светового потока вводится положительная поправка на световой поток у цоколя лампы. Это та доля общего светового потока лампы, которая при нормальном расположении последней цоколем вверх вовсе не поддается измерениям (точки  $175-185^\circ$ ) или частично затеняется держателем лампы ( $160-170^\circ$  и  $190-200^\circ$ ).

Для определения поправки по две лампы тех же типов (№ 9 и № 12), но не из числа эталонных ламп, измерялись с приклеенным к нижней части колбы дополнительным цоколем. Последний служил для крепления лампы при расположении ее настоящим цоколем вниз.

В этом положении световой поток ламп измерялся в пределах  $330-30^\circ$  (или  $310-50^\circ$ ) и  $150-210^\circ$  (или  $130-230^\circ$ ). Отношение первой величины ко второй позволило определить поправку на ту долю общего светового потока лампы, которую нельзя было учитывать при обычных измерениях на распределительном фотометре.

б) Поправка на вращение лампы. Изменяя условия охлаждения нити вследствие иного под действием центробежной силы соприкосновения ее с поддерживающими крючками, а также вследствие изменения условий охлаждения газополной лампы, вращение лампы вызывает изменения и в ее силе тока и в световом потоке. Изменения эти определялись опытным путем для каждой лампы посредством особо поставленных измерений

<sup>1</sup> См. „Поверочное дело“, 1929, № 3 (20), стр. 168.

в светомерном шаре.<sup>1</sup> Скорость вращения лампы поддерживалась при этом такой же, что и при измерениях на распределительном фотометре. Точно так же, в обоих случаях лампа закреплялась в одном и том же держателе с теми же контактными кольцами и щетками.

### 7. Электрические измерения

Подводка питания к эталонной лампе (вследствие ее вращения во время измерений) осуществляется через медные щетки, скользящие по двум медным же кольцам с эбонитовой прокладкой между ними. От колец проводники припаиваются непосредственно к цоколю лампы. Наличие скользящих контактов в цепи эталонной лампы вносит некоторые затруднения в электрические измерения. Трение щеток о кольца создает контакт переменного сопротивления; появление на эбонитовой прокладке металлической пыли от стирания щеток временами ухудшает состояние изоляции. В особенности при мощных лампах замечается иногда небольшая неустойчивость в силе тока и напряжении.

Постоянство напряжения у эталонной лампы и лампы сравнения поддерживалось посредством двух потенциометрических установок с точностью до 0,01 V.

### 8. Соотношение единиц светового потока — новой и прежде действовавшей

Сличение нового люмена с прежним значением этой единицы производилось в светомерном шаре диаметром 1 м в обычных для того условиях измерений. Для сличений были подобраны наиболее близкие по спектру и по распределению силы света прежние производные эталоны люмена. Электрические измерения производились на тех же потенциометрических установках, которые применялись при работе на распределительном фотометре.

### 9. Установление пустотной части эталона-копии основного светового эталона для единицы светового потока с цветовой температурой 2355° K

Распределение силы света было измерено на распределительном фотометре для 12 ламп типа № 9, с обозначениями с П-1-51 по П-1-62.

При этих измерениях применялась лампа сравнения, типа № 4, горевшая при напряжении 92 V. В качестве эталонов силы света были использованы лампы рабочего эталона с обозначениями 2-6—2-12, с цветовой температурой 2355° K. Все эти лампы устанавливались поочередно, по четыре за день измерений.

<sup>1</sup> Выполнить их на распределительном фотометре не представляется возможным, так как нельзя с уверенностью предполагать, чтобы соотношения световых потоков неподвижной и вращающейся ламп были одинаковы с таким соотношением для силы света в различных направлениях.

Мигание полей сравнения почти не ощущалось в широких пределах поворота пластинки  $A_1$ , приблизительно от  $50^\circ$  до  $130^\circ$  и от  $230^\circ$  до  $310^\circ$ , в соответствии с расположением нитей накаливания в лампах этого типа. (Нить состоит из длинных вытянутых вдоль вертикальной оси лампы отрезков, симметрично заполняющих боковую поверхность цилиндра.) Наиболее значительные мигания наблюдаются в участках  $20-40^\circ$ ,  $150-170^\circ$  и, соответственно,  $340-320^\circ$  и  $210-190^\circ$ . Однако в большинстве случаев имевшееся мигание не вызывало особых затруднений в нахождении границ фотометрического равенства.

Более неблагоприятным обстоятельством следует считать малую (за исключением немногих точек) яркость полей сравнения,<sup>1</sup> в среднем составляющую около 0,3 мсб, но доходящую (в направлениях вблизи цоколя) до 0,05 мсб. Впрочем, это обстоятельство являлось скорее известным неудобством, но не могло вносить заметной погрешности в измерения, поскольку поля сравнения (при белой пластинке  $A_1$ ) были вполне одноцветными и одного спектрального состава. Повторение начальной точки ( $270^\circ$ ) в конце измерений служит в этом отношении свидетельством как устойчивости лампы, так и точности измерений. В среднем — поправка на изменение светового потока лампы за время ее горения при измерениях составляет всего  $+0,02\%$ , хотя для отдельных ламп доходит до  $\approx 0,1-0,2\%$ . Однако эта величина лежит в пределах точности самих световых измерений. Ввиду того, что значение единицы, воспроизводимой всеми лампами, практически от этой поправки не зависит, в окончательные данные светового потока она не вводилась.

Изменения силы тока за время измерений лампы на распределительном фотометре также незначительны. В среднем они достигают примерно  $+0,03\%$ , что, в свою очередь, свидетельствует об устойчивости ламп и малой вероятности изменения их световых потоков за время вращения.

Поправка на световой поток у цоколя лампы составила около  $0,2\%$  в общем значении светового потока. Для каждой лампы она вычислялась в отдельности для той части светового потока лампы, которая заключена в телесном угле от  $150^\circ$  до  $210^\circ$ .

Изменение светового потока ламп при их вращении, определенное по измерениям в светомерном шаре, составило в среднем около  $-0,4\%$  (т. е. при вращении ламп этого типа световой поток падает в среднем на  $0,4\%$ ).

Соответствующие поправки (на поток у цоколя и на вращение), свои для каждой лампы, введены в окончательные значения световых потоков.

Влияния вращения на силу тока в лампах этого типа не было обнаружено.

<sup>1</sup> При цветовой температуре 2355° К номинальное напряжение ламп типа № 9 снижается приблизительно на 10%, откуда вытекает и значительное уменьшение светового потока.

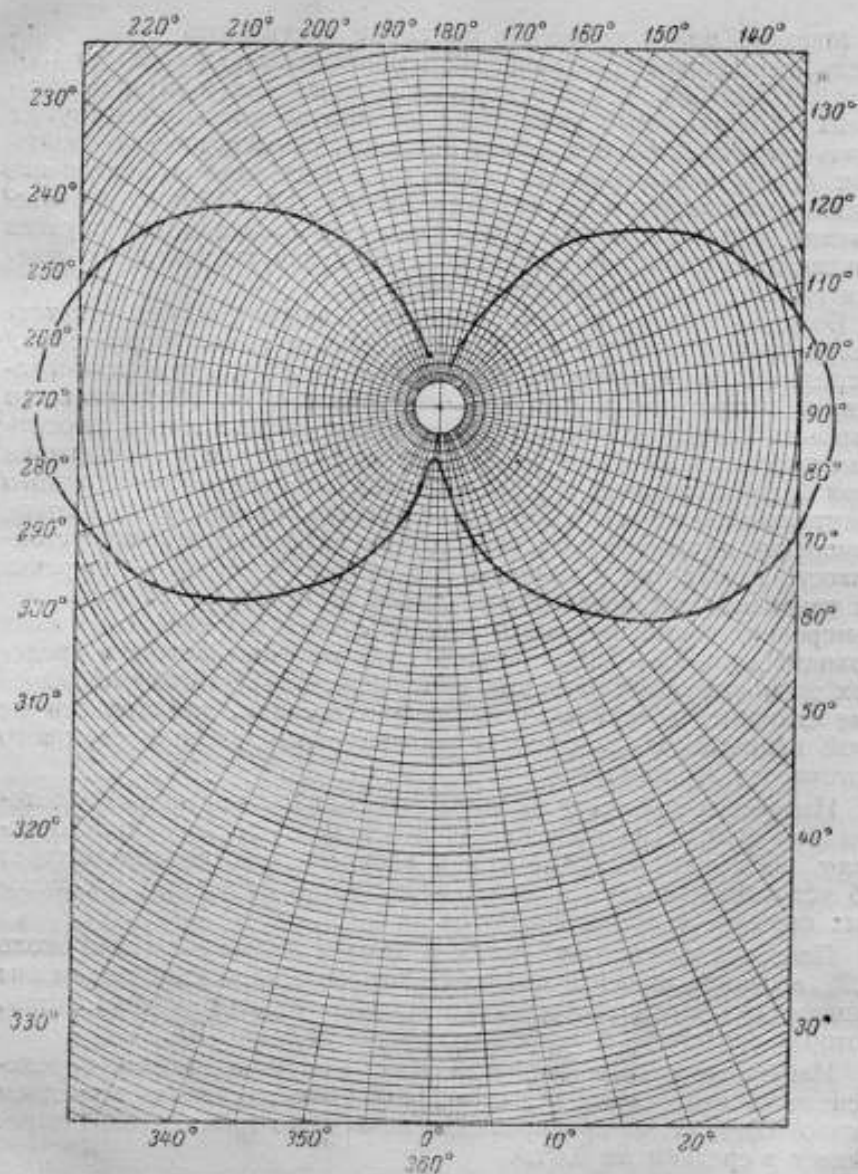


Рис. 2.

Распределение силы света для одной из ламп приведено на рис. 2. Обращает внимание значительная несимметричность участков кривой около цоколя.

В светомерном шаре лампы П-1-51 — П-1-62 были сличены с пустотными лампами прежнего производного эталона люмена, состоящего из 12 ламп с обозначениями П-1-6—П-1-17.

Значение световых потоков в новых единицах численно превышает старые значения в среднем по группе на 0,5%. Этот множитель вполне совпадает с таковым, установленным для перехода от силы света в международных свечах к выражению ее в новых свечах.<sup>1</sup>

В качестве вторичных эталонов одновременно изготовлены путем сличения в шаре с лампами П-1-51—П-1-62 шесть ламп типа № 9 с обозначениями П-1-63—П-1-68.

Основная группа двенадцати ламп с обозначениями П-1-51—П-1-62 воспроизводит единицу светового потока—новый люмен—с средней квадратичной ошибкой

$$\delta = \sqrt{0,13^2 + 0,08^2 + 0,13^2} = \pm 0,2\%$$

где составляющие квадратичные погрешности отражают соответственно: ошибку измерений на распределительном фотометре, ошибку в определении поправки на вращение лампы и ошибку в воспроизведении единицы силы света—новой свечи—лампами 2-6—2-12.

Данные для указанной группы ламп приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пустотная часть нового производного эталона люмена при цветовой температуре 2355°K

| Обозначения ламп                       | Напряжение у цоколя лампы в абсолютных вольтгах | Сила тока в лампе в абсолютных амперах | Световой поток                          |                    | Световой поток по измерениям на распределительном фотометре <sup>2</sup> |       |       |       |         | Среднее отклонение наблюдателей от среднего, % |
|--|---|--|---|--------------------|--|-------|-------|-------|---------|--|
|  |   |  | в новых люменах на распредел. фотометре | в прежних единицах | наблюдатели  |       |       |       | среднее |  |
|  |   |  |   |                    | 1-й  | 2-й   | 3-й   | 4-й   |         |  |
| П-1-51                                 | 97,3 <sub>34</sub>                              | 0,5465                                 | 343,1                                   | 344,1              | —  | 345,6 | 344,9 | —     | 345,0   | ±0,1   |
| П-1-52                                 | 97,6 <sub>34</sub>                              | 0,5461                                 | 350,0                                   | 349,0              | —  | —     | 346,3 | 349,4 | 347,0   | ±0,5   |
| П-1-53                                 | 97,5 <sub>34</sub>                              | 0,5483                                 | 357,0                                   | 352,8              | 355,2  | —     | —     | 355,6 | 355,4   | ±0,1   |
| П-1-54                                 | 97,1 <sub>34</sub>                              | 0,5477                                 | 349,8                                   | 348,4              | 346,0  | —     | 347,0 | 349,3 | 348,4   | ±0,5   |
| П-1-55                                 | 97,8 <sub>34</sub>                              | 0,5490                                 | 350,8                                   | 346,7              | 351,0  | —     | —     | 349,1 | 350,0   | ±0,3   |
| П-1-56                                 | 98,1 <sub>34</sub>                              | 0,5466                                 | 360,0                                   | 357,1              | —  | 359,0 | 356,0 | —     | 357,9   | ±0,3   |
| П-1-57                                 | 97,3 <sub>34</sub>                              | 0,5464                                 | 348,0                                   | 349,1              | 347,3  | 348,6 | —     | —     | 345,3   | ±0,1   |
| П-1-58                                 | 96,5 <sub>34</sub>                              | 0,5457                                 | 342,2                                   | 340,9              | 338,4  | 340,9 | —     | —     | 339,8   | ±0,3   |
| П-1-59                                 | 96,7 <sub>34</sub>                              | 0,5446                                 | 344,4                                   | 341,7              | —  | 345,5 | 340,5 | —     | 343,0   | ±0,7   |
| П-1-60                                 | 99,3 <sub>35</sub>                              | 0,5495                                 | 356,1                                   | 353,0              | —  | 344,1 | 351,2 | —     | 347,0   | ±0,0   |
| П-1-61                                 | 97,1 <sub>34</sub>                              | 0,5468                                 | 346,3                                   | 344,0              | 344,8  | 345,9 | —     | —     | 345,0   | ±0,2   |
| П-1-62                                 | 97,1 <sub>34</sub>                              | 0,5452                                 | 338,7                                   | 336,8              | 339,1  | 338,8 | —     | —     | 338,8   | ±0,0   |
| Среднее арифметическое для одной лампы |   |  |   |                    |  |       |       |       |         | ±0,3   |
| Среднее квадратичное для одной лампы   |   |  |   |                    |  |       |       |       |         | ±0,4   |
| Среднее квадратичное результата        |   |  |   |                    |  |       |       |       |         | ±0,1   |

<sup>1</sup> См. П. М. Тиходеев, Новый государственный световой эталон СССР.

<sup>2</sup> Без поправки на вращение лампы.

## 10. Установление газополной части эталона-копии основного светового эталона для единицы светового потока с цветовой температурой 2800° К

Распределение силы света определялось для 12 ламп типа № 12 с обозначениями с П-1-69 по П-1-72, с П-1-75 по П-1-78 и с П-1-79 по П-1-83. При этих измерениях применялась лампа сравнения типа № 6 (ОСТ 8273), горевшая при напряжении 83 В. Пластика сравнения  $A_2$  была голубоватой для уравнивания цветов полей сравнения. Все же полной одноцветности их получить не удалось.<sup>1</sup>

Расположение нити накаливания у ламп этого типа в виде коротких отрезков спиралей, размещенных по поверхности цилиндра не столь симметрично, как в типе № 9 (из-за широкого расстояния между вводными электродами), обуславливает заметное мигание яркости полей сравнения, притом в значительно более широких пределах поворота пластинки  $A_2$ , чем это было в предыдущем случае. Наиболее „спокойными“ точками оказываются здесь лежащие около 0°.

Яркость поля сравнения, напротив, была здесь очень значительной (до 2,5–3 мсб и не меньше 0,5 мсб).

Для перехода к цветовой температуре 2800° К потребовалось установить вспомогательную группу рабочего эталона силы света. По причине их большой устойчивости была выбрана группа прежнего вторичного эталона с обозначениями П-4-1—П-4-3 и П-4-5—П-4-6, составленная из ламп типа № 5. Применявшиеся прежде при напряжении 107 В лампы П-4 были поверены на цветовую температуру 2360° К, а затем на силу света по рабочим эталонам 2-6—2-12 с близкой цветовой температурой—2355° К. Напряжение у ламп П-4... оказалось при этом сниженным на 3–4%, сила света соответственно на 10–11%. Такое незначительное уменьшение последней позволило без заметного снижения яркости поля сравнения применить со стороны эталонной лампы голубое стекло (с общим коэффициентом пропускания 0,59) для повышения кажущейся цветовой температуры лампы до 2800° К.

Точное значение общего коэффициента пропускания голубого стекла вычислено на основании измеренных с этой целью его спектральных коэффициентов пропускания в области видимого спектра.

Порядок применения эталонных ламп П-4... при измерениях на распределительном фотометре был таким же, как в предыдущем случае, при установлении пустотной группы эталона люмена. В течение дня ставились поочередно четыре лампы, две в начале и две в конце измерений.

Вследствие значительно менее благоприятных условий фотометрирования (по причине некоторого мигания яркости полей сравнения, относящегося при этом в основном к направлениям наибольшей силы света, рис. 3) по сравнению с лампами первой

<sup>1</sup> Вполне одноцветными были в этом случае лишь измерения с эталонами силы света (см. ниже).

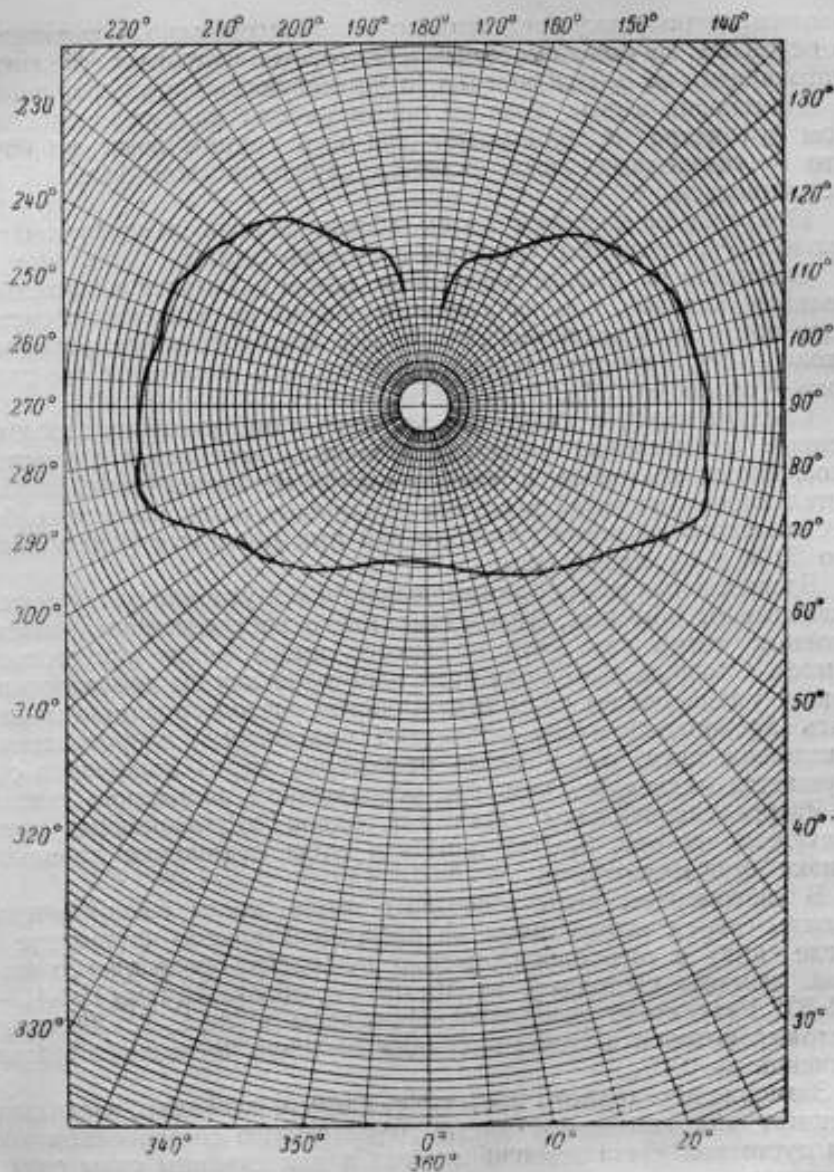


Рис. 3.

пустотной части эталона люмена — и устойчивость измерений оказалась здесь меньшей.

Расхождение начальных и конечных измерений при одном выбранном направлении (в некоторых случаях при  $0^\circ$ , но в большинстве при  $270^\circ$ ) доходило у отдельных ламп до  $\approx 0,5 - 0,8\%$ . Для всех 12 ламп оно составляет в среднем около  $-0,2\%$ ; однако

вводить эту поправку представлялось нецелесообразным, поскольку в основном ее значение характеризует не изменение светового потока ламп за время горения, а устойчивость самих измерений.

Изменения в силе тока за время работы на распределительном фотометре не превышают для всей группы ламп  $+0,03\%$ , что у газополных ламп является свидетельством большой их устойчивости.

Поправка на световой поток вблизи цоколя лампы составляет около  $0,3\%$  от общего значения светового потока.

Вращение на данные газополные лампы оказывает значительно большее влияние, чем на лампы первой части. Изменение светового потока при вращении газополных ламп составляет в среднем около  $+2\%$  (вместо  $-0,4\%$  у пустотных), изменение же силы тока — около  $-0,18\%$ .

Следует иметь в виду, что электрические измерения, осложненные в установке распределительного фотометра наличием скользящих контактов в измерительной и токовой цепи, дополнительно осложняются в случае газополных ламп вследствие более высокого значения потребляемой ими мощности ( $250\text{ W}$  вместо  $50\text{ W}$  у пустотных ламп).

Вращение газополной лампы создает в ней условия охлаждения, отличные от обычных, вследствие иного распределения конвекционных токов газа (что не может иметь места в пустотной лампе). Обнаруженное<sup>1</sup> при этом некоторое как бы противоречие между уменьшением силы тока и ростом светового потока может быть предположительно объяснено увеличением сопротивления накаливаемой нити, отвод тепла от которой через конвекцию совершается медленнее, чем при неподвижном положении лампы.

Распределение силы света для одной из газополных ламп приведено на рис. 3. Все лампы в этом отношении довольно близки друг к другу.

В светомерном шаре указанные выше лампы были сличены дважды (перед измерениями на распределительном фотометре и после них) с газополной частью прежнего производного эталона люмена, состоящей из 10 ламп с обозначениями П-1-41 — П-1-50. Результаты измерений приведены в табл. 2. Значения световых потоков в новых единицах численно превышают старые значения на  $0,4\%$ .

Значение переходного множителя к новым единицам, несколько отличное для газополной части по сравнению со значением его для пустотной части эталона люмена и для единицы силы света, совпадает, однако, с последним в пределах точности измерений.

Следует также иметь в виду, что влияние отдельных наблюдателей имело при измерениях газополной группы несколько большее значение, чем в случае пустотных ламп, вследствие не вполне одинакового спектрального состава света от обеих частей

<sup>1</sup> Что находится в согласии с предыдущими исследованиями газополных ламп (см. „Работы ВНИИМ по световым эталонам 1930—1932 гг.“, издание ВНИИМ 1934, № 133, стр. 3—17).



Газополная часть нового производного эталона люмена с цветовой температурой 2900°K

| Обозначение лампы | Напряжение в абсолютных вольтах | Сила тока в абсолютных амперах | Световой поток в люменах |              |         |          | Световой поток по измерениям на распределительном фотохроме 1 |     |     |     |     |         | Среднее отклонение от среднего, %      |   |      |      |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------|---------|----------|---|-----|-----|-----|-----|---------|--|---|------|------|
|                   |                                 |                                | 20.IX 1947 г.            | 17.I 1948 г. | среднее | в ночных | наблюдатели   |     |     |     |     |         |  |   |      |      |
|                   |                                 |                                |                          |              |         |          | 1-й   | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | среднее |  |   |      |      |
| П-1-69            | 104,6 <sub>47</sub>             | 2,211 <sub>4</sub>             | 3137                     | 3197         | 3167    | 3214     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3157 | ±0,6 |
| П-1-70            | 106,4 <sub>57</sub>             | 2,340 <sub>6</sub>             | 3432                     | 3442         | 3437    | 3475     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3387 | ±0,2 |
| П-1-71            | 106,9 <sub>47</sub>             | 2,253 <sub>2</sub>             | 3421                     | 3432         | 3426    | 3421     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3369 | ±0,1 |
| П-1-72            | 105,5 <sub>27</sub>             | 2,325 <sub>4</sub>             | 3412                     | 3434         | 3423    | 3455     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3347 | ±0,1 |
| П-1-75            | 111,7 <sub>20</sub>             | 2,218 <sub>3</sub>             | 3446                     | 3453         | 3450    | 3459     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3398 | ±0,8 |
| П-1-76            | 110,0 <sub>38</sub>             | 2,313 <sub>4</sub>             | 3585                     | 3623         | 3604    | 3646     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3525 | ±0,0 |
| П-1-77            | 105,9 <sub>47</sub>             | 2,219 <sub>6</sub>             | 3401                     | 3413         | 3407    | 3404     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3323 | ±0,5 |
| П-1-78            | 107,4 <sub>38</sub>             | 2,236 <sub>2</sub>             | 3493                     | 3501         | 3497    | 3499     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3463 | ±0,6 |
| П-1-80            | 107,8 <sub>8</sub>              | 2,261 <sub>2</sub>             | 3507                     | 3529         | 3518    | 3585     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3471 | ±0,6 |
| П-1-81            | 107,7 <sub>38</sub>             | 2,239 <sub>7</sub>             | 3502                     | 3518         | 3510    | 3464     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3544 | ±1,3 |
| П-1-82            | 106,0 <sub>47</sub>             | 2,218 <sub>2</sub>             | 3350                     | 3392         | 3376    | 3339     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3398 | ±1,0 |
| П-1-83            | 106,1 <sub>47</sub>             | 2,211 <sub>6</sub>             | 3374                     | 3406         | 3390    | 3384     | —   | —   | —   | —   | —   | —       | —                                      | — | 3422 | ±0,3 |
|                   |                                 |                                |                          |              |         |          |   |     |     |     |     |         | Среднее арифметическое для одной лампы |   | ±0,5 |      |
|                   |                                 |                                |                          |              |         |          |   |     |     |     |     |         | Среднее квадратичное для одной лампы   |   | ±0,8 |      |
|                   |                                 |                                |                          |              |         |          |   |     |     |     |     |         | Среднее квадратичное результатов       |   | ±0,2 |      |

1. Без внесения поправок на яркость лампы в д.р.

сравнения. С другой стороны, только двое из пяти наблюдателей, участвовавших в настоящих измерениях, принимали участие и в установлении прежнего производного эталона люмена. Неравномерное по объему (по числу измеренных ламп) участие каждого наблюдателя в настоящей работе было отчасти уравнено при вычислениях посредством перераспределения весов измерений. Основанием к такому, может быть, несколько условному приему расчетов служит то соображение, что воспроизведение световых единиц (в особенности при не вполне одинаковом спектральном составе излучений, подлежащих измерениям) осуществляется с тем большей точностью и тем большим приближением к показаниям „среднего“ глаза, чем большее число наблюдателей участвует в измерениях. Поэтому индивидуальные свойства глаз наблюдателей — участников работы — должны быть в равной мере отражены в значении воспроизводимой единицы.

Впрочем, если бы даже не уравнивать участие в измерениях отдельных наблюдателей, что было бы, как пояснено выше, по существу неправильно, значение единицы, воспроизводимой этой частью эталона-копии, не изменилось бы более, чем на  $+0,15\%$ .

Средняя квадратичная погрешность при воспроизведении единицы светового потока — нового люмена — газополной частью нового эталона (из 12 ламп) составляет:

$$\sigma = \sqrt{0,23^2 + 0,13^2 + 0,20^2} = 0,35\%$$

где отдельные квадратичные погрешности равны соответственно погрешностям: при измерениях на распределительном фотометре, в определении поправки на вращение лампы и воспроизведении единицы силы света — новой свечи — группой ламп П-4...

Работа выполнялась В. Е. Карташевской под руководством проф. П. М. Тиходеева и при его непосредственном участии, а также сотрудниками Фотометрической лаборатории ВНИИМ — А. М. Сабуренковым, З. Н. Энно и Е. Н. Юстовой.

Способы измерения и расчетов и основная конструкция измерительной установки были разработаны ранее, при осуществлении прежде действовавшего производного эталона люмена проф. П. М. Тиходеевым с участием сотрудников Фотометрической лаборатории ВНИИМ.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> П. М. Тиходеев, Установление первичного эталона люмена, „Временник“, 1930, (4/16), стр. 31—56.

Е. Д. Девяткова, Установление второй части эталона люмена СССР. Работы Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии и стандартизации по световым эталонам 1930—1933 гг., ВНИИМ, 1934, № 133, стр. 3—17.

## СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Люминесцентные электрические лампы, как известно, являются новыми источниками света, которые нашли уже быстро увеличивающееся распространение.

Современные световые измерения наиболее приспособлены к электрическим лампам накаливания. Это справедливо не только в отношении обычных практических измерений, но и для метрологического и поверочного дела. Естественно возникает вопрос: в какой мере световая метрология готова к обслуживанию измерений люминесцентных ламп? Что нужно подготовить и предусмотреть, чтобы помочь практике с достаточной полнотой и надлежащей точностью исследовать и измерять такие лампы?

На основании знакомства с опубликованной литературой о новых лампах можно было считать, что готовность к метрологическому обслуживанию соответствующего измерительного дела имеется (во ВНИИМ). Однако надо было тщательно проверить такую подготовку на деле и попутно выяснить, что следует усовершенствовать. А для этого прежде всего требовались всесторонние измерения люминесцентных ламп в условиях достаточно определенных и надежных. Такая надобность вызывалась и заметной неполнотой отечественных данных о свойствах люминесцентных ламп. Известные опасения имелись и в отношении надежности опубликованных данных по электрическим измерениям малых переменных токов и малых мощностей.

Исходя из указанных выше соображений, и была проведена настоящая работа, ставящая своей целью метрологические исследования световых и электрических свойств люминесцентных ламп.

Люминесцентная лампа обладает рядом свойств, которые определяют широкое распространение ее в самом ближайшем будущем. Исходя из этого, естественно возникает насущная необходимость разработать соответствующую методику световых измерений люминесцентных ламп с учетом всех тех особенностей, которые им присущи.

Люминесцентная лампа оказывается источником света, отличающимся не только от электрической лампы накаливания, но и от газосветного источника, в котором используется электрический

разряд в атмосфере газа или пара. Процесс превращения электрической энергии в световую в люминесцентной лампе проходит двухступенчато: сначала эта энергия превращается (в большей части) в энергию ультрафиолетовых излучений, которые затем, действуя на люминофоры, вызывают свечение последних. Следовательно, в этой лампе используется одновременно газовый разряд и явление люминесценции твердых тел, а потому и излучение люминесцентной лампы представляет собою сплошной спектр с наложенными на него спектральными линиями. Лишь совместный учет процессов каждого из этих преобразований энергии, очевидно, определяет экономичность люминесцентного источника света.

В качестве источника ультрафиолетовых излучений в люминесцентной лампе используется электрический разряд в парах ртути при низком давлении порядка 0,01—0,1 мм ртутного столба. Известно, что в таком разряде преобладают две резонансные линии с длинами волн 185,0 и 253,7 мк, на долю которых приходится около 80% всей энергии разряда. Излучения указанных резонансных линий способны возбуждать соответствующие вещества — люминофоры, каждому из которых присуща определенная полоса люминесценции в спектре.

Современные люминесцентные лампы изготавливаются преимущественно двух основных типов, а именно так называемые „белые“ и „дневные“. В первых используется в качестве люминофора цинкбериллийсиликат ( $ZnBeSiO_3$ ) с соответствующими добавками, а во вторых — смесь последнего с вольфраматом магния ( $MgWO_4$ ), почему и кривые распределения энергии у этих двух типов ламп имеют соответственно один ( $\lambda_{max} \approx 610$  мк) и два ( $\lambda_{max} \approx 480$  и  $\lambda_{max} \approx 610$  мк) максимума.

Полной неизменности люминофора в период его работы внутри колбы пока не достигнуто, а потому с течением срока службы лампы, в силу, как предполагают, фотохимического воздействия разряда и паров ртути, яркость люминофора падает.

Послесвечение люминофора, длящееся примерно 0,1—0,01 сек., сообщает лампе одно из положительных свойств, а именно — некоторое уменьшение глубины колебания светового потока по сравнению с таковой у чисто ртутной лампы.

Газовый разряд в люминесцентной лампе, имеющий характер отрицательного электрического сопротивления, притом особого рода, определяет собой и вид тех зависимостей силы тока, напряжения и мощности, которыми эта лампа отличается от лампы накаливания. Исследование и анализ этих зависимостей или характеристик представляет определенный интерес для суждения о технических и эксплуатационных свойствах люминесцентных ламп. Совершенно естественно упомянутые зависимости выражать в функции напряжения сети, в которую лампа включается, иначе говоря — в зависимости от изменения питающего лампу напряжения. Снятие электрических характеристик у люминесцентной лампы, включенной в сеть переменного тока, принципиально не представляет трудностей и требует лишь, наряду с приборами

электродинамического типа, электростатического вольтметра для измерения падения напряжения на лампе. Использование вместо электростатического обычного типа вольтметра, даже со сравнительно большим его внутренним сопротивлением, вызывает нарушение нормального режима горения лампы.

В данных исследованиях не рассматривается возможность включения лампы в цепь постоянного тока, так как обычные лампы рассчитаны на переменный ток.

Люминесцентная лампа при питании ее переменным током представляет собой источник света с переменным во времени световым потоком, который притом является величиной составной. Действительно, он складывается из потоков излучения ртутного разряда и излучения люминофора, колебания которых за полупериод изменения переменного тока отличны по своему характеру. В силу периодического полного прекращения электрического разряда величина излучения от ртутного разряда изменяется от нуля до известного максимума. Излучение же люминофора, будучи в 7—8 раз больше излучения разряда, меняется по величине в иных пределах, притом по фазе колебание оказывается несколько сдвинутым. Указанное обстоятельство, очевидно, определяет периодическое изменение светового потока люминесцентной лампы не только по величине, но также и по спектральному его составу.

Происходящее периодическое изменение цвета излучения лампы может наблюдаться при использовании известного приема с синхронно вращающимся диском, имеющим надлежащие секторные вырезы. Однако лучший, а главное, более четкий результат был получен при вращении самой лампы вокруг оси, перпендикулярной к продольной оси лампы. Таким образом, можно было проследить последовательный переход голубовато-зеленой окраски излучения в желто-красноватую, причем эти наблюдения производились при изменении как величины подводимого к лампе напряжения, так и частоты переменного тока (до 25 Hz). В последних случаях соотношение угловых размеров светлой и темной фаз переменного излучения можно было произвольно изменять.

Исследовались лампы завода МЭЛЗ (20 W) и фирмы Орион (15 и 30 W), каждого типа — по 3—4 лампы. Так как для каждой такой группы полученные величины оказались весьма близкими, то средние их значения принимались для графического построения характеристических зависимостей. В частности, анализ электрических характеристик, в силу их одинаковости для ламп всех трех типов, может быть произведен обобщенно.

С повышением подводимого к лампе напряжения падение напряжения на зажимах лампы растет прямолинейно до некоторого момента, определяемого работой автоматического реле. При напряжении на лампе около 80—85 V реле (разрядного типа) вспыхивает, а при 95—100 V начинает мигать вследствие соприкосновения его биметаллических контактов — электродов, осуществляющих замыкание цепи накаливаемых электродов лампы. Мигание

реле быстро прекращается, как только лампа загорается, а падение напряжения на лампе снижается примерно до 70–80 В.

Дальнейшее повышение подводимого напряжения вызывает уменьшение падения напряжения на лампе  $V_a$ , идущее по некоторой кривой, а сила тока  $I$  и потребляемая лампой электрическая мощность  $P$  при этом увеличиваются почти прямолинейно. Коэффициент мощности цепи  $\cos \varphi$  с повышением подводимого напряжения на 25% (против номинальных 120 В) уменьшается до 0,5 против 0,8 при загорании лампы. Конденсатор для улучшения  $\cos \varphi$  в данном случае не применялся. На рис. 1 и 2 приведены соот-

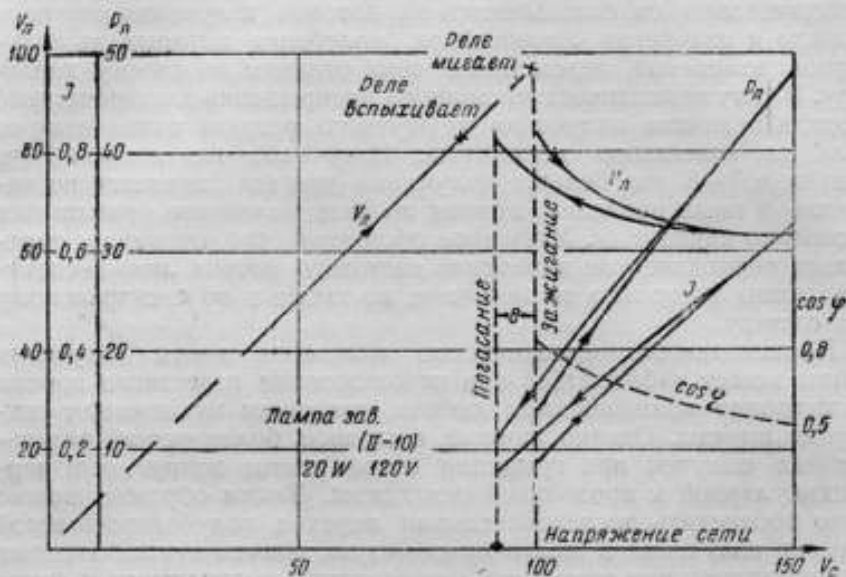


Рис. 1.

ветствующие зависимости, полученные для ламп завода МЭЛЗ на 20 W, 120 В и для ламп Орион на 15 W, 120 В.

Последующее затем уменьшение подводимого напряжения вызывает идущие в обратном направлении подобные им изменения  $V_a$ ,  $I$  и  $P$ , однако абсолютные значения  $V_a$  остаются меньшими, а абсолютные значения  $I$  и  $P$  — большими соответствующих значений в период повышения подводимого напряжения.

В соответствии с присущим газовому разряду свойством, люминесцентная лампа погасает при напряжении сети меньшем того, при котором она загорелась. Для ламп Орион 15 W, 120 В разность составляет примерно 25 В, для ламп же завода МЭЛЗ 20 W, 120 В — всего лишь 8–10 В.

Лампы Орион на 220 В, 30 W в отношении рассмотренных характеристик не обнаруживают каких-либо особенностей, а потому не нуждаются в особых пояснениях.

На рис. 3 приведены рассмотренные выше электрические характеристики для исследованных типов ламп в процентном выражении по отношению к номинальным значениям величин, принятых за 100%. В данном случае различия между типами ламп видны ясно, хотя нельзя не учитывать и различия в номинальной мощности этих ламп.

Для суждения о люминесцентной лампе как источнике света с определенным распределением силы света, яркости и т. д. вообще нет необходимости производить обязательно абсолютные измерения. Для этого можно ограничиваться лишь снятием у лампы относительных характеристик, которые в равной степени опреде-

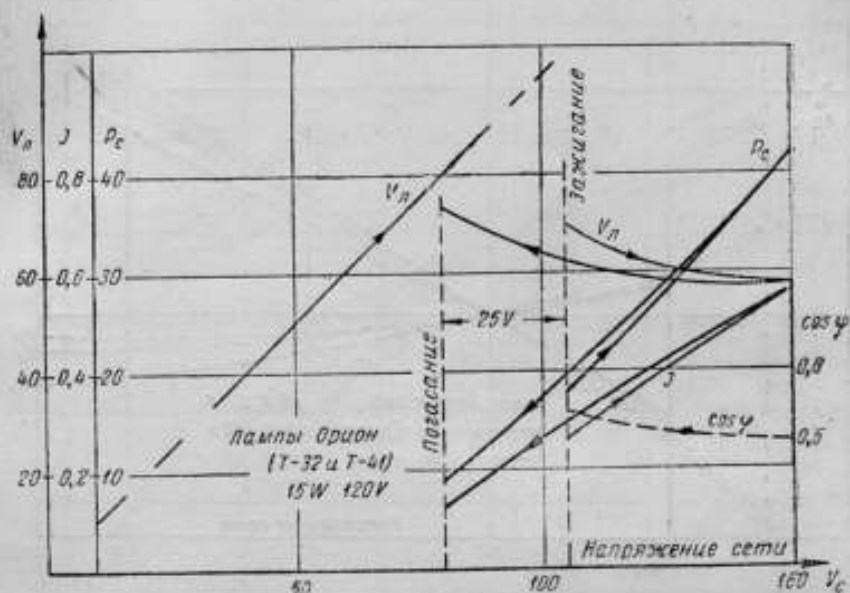


Рис. 2.

ляют световые свойства ламп. Исходя из этого, в данном случае при определении относительной силы света люминесцентной лампы в зависимости от напряжения сети  $V_c$  лампа измерялась на светомерной скамье с помощью обычной светомерной головки и при использовании в качестве лампы сравнения подобной ей люминесцентной лампы. При этом, очевидно, фотометрирование не вызывает затруднений вследствие одноцветности полей сравнения.

Из соображений удобства, с одной стороны, и соблюдения условий, необходимых для действительности закона квадратов расстояний, с другой, колба лампы перед измерениями закрывалась надетьми на нее цилиндрами из черной бумаги так, что оставался свободным лишь участок в средней части колбы с длиной, равной диаметру колбы. Указанное покрытие на колбе, ко-

нечно, должно создать несколько измененный режим работы лампы за счет повышения температуры стенок колбы (что, как известно, имеет существенное значение в отношении световой отдачи), но в данном случае казалось допустимым не учитывать этого, так как (по измерениям) такое повышение было невелико, температура же окружающего колбу воздуха в помещении была низкой (12—13°). В данном случае, следовательно, покрытие колбы, наоборот, создавало более нормальный температурный режим лампы. По литературным данным, уменьшение температуры колбы до 10° уменьшает соответственно мощность лампы на 2% и све-

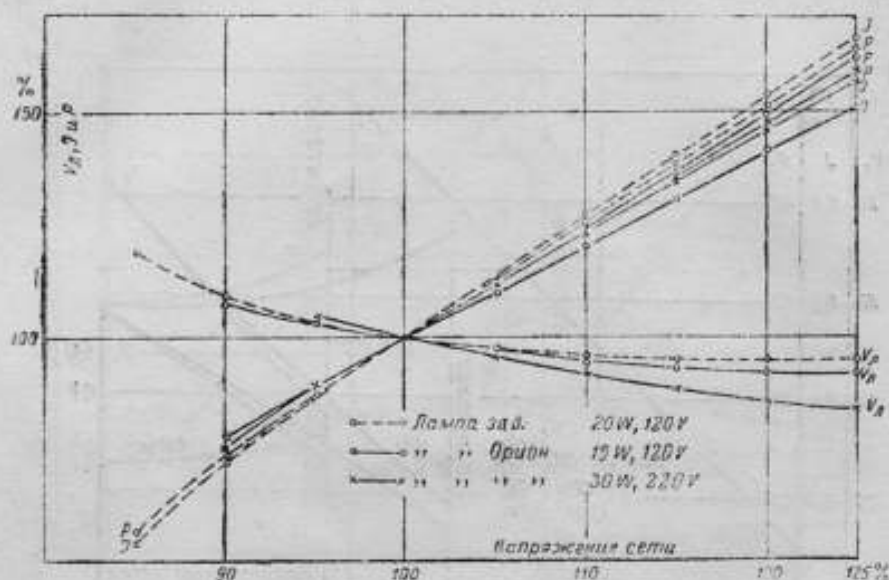


Рис. 3.

товой поток на 15%, уменьшение же температуры до 5° уменьшает мощность на 4% и световой поток на 30%.

Так как лампе требуется некоторое время для разгорания (при пониженных величинах напряжения—до 10—12 мин.), то фотометрирование производилось всякий раз по наступлении устойчивого режима.

На рис. 4 приведены кривые относительного (в %) изменения силы света у различных типов ламп в зависимости от напряжения сети. В частности, оказывается, что лампы завода МЭЛЗ изменяют свою силу света при колебаниях сетевого напряжения несколько больше, нежели лампы фирмы Орион, хотя и последние в зависимости от типа ведут себя далеко не одинаково. В среднем можно считать, что изменение сетевого напряжения от номинального на  $\approx 10\%$  вызывает соответственно изменение относительной силы света люминесцентной лампы на  $\approx 15\text{--}20\%$ .



Таким же путем измерения силы света были произведены и при исследовании длительности и характера разгорания люминесцентных ламп различного типа. При этом сила света лампы, при напряжении, близком к потенциалу зажигания, измерялась по зажиганию лампы через промежутки времени в 0,5 мин. непрерывно до наступления стационарного режима. Как отмечалось уже ранее, такой режим наступал через 10—12 мин. по включении лампы при наименьшем возможном для лампы напряжении. При больших значениях напряжения длительность разгорания ламп, естественно, уменьшается.

Для исследования распределения яркости по длине лампы у электродного ее конца, а также для абсолютного измерения

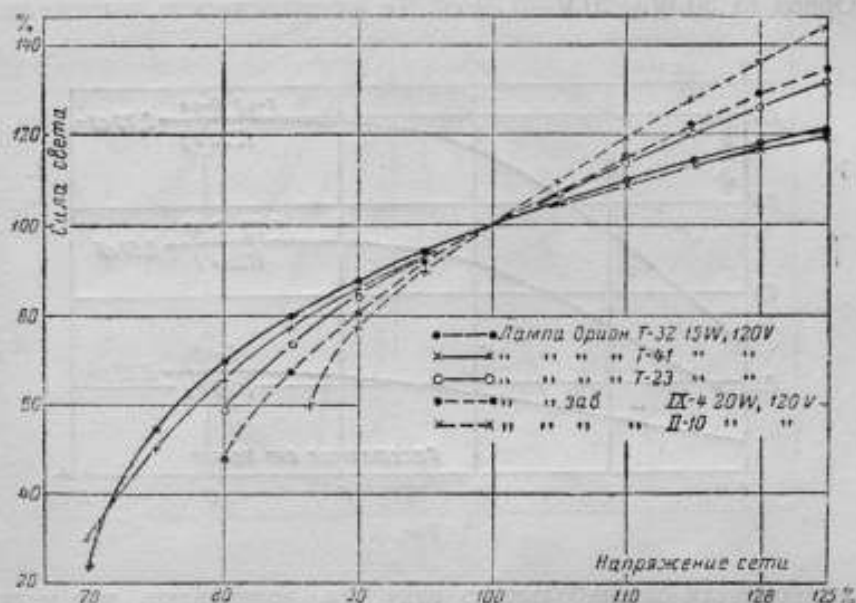


Рис. 4.

этой яркости был применен предварительно проградуированный универсальный фотометр (типа Бехштейна), установленный на светомерной скамье. На расстоянии 1 м от него находился неподвижный черный металлический щиток с диафрагмой, охватывающий колбу лампы, установленной подвижно позади него. Диафрагма выделяла участок колбы длиной в 2 см, и сила света этого участка известной площади (так как диаметр колбы предварительно точно измерялся) подлежала измерению. Лампу перемещали позади диафрагмы с помощью кремальерного приспособления в направлении оси колбы. Таким образом можно было последовательно измерить силу света выделяемых участков от самого ближнего к цоколю до некоторых удаленных от него, где сила света, будучи наибольшей, остается постоянной на некоторой длине колбы. По величинам силы света и светящейся

площади затем определялась средняя яркость соответствующих участков колбы.

Для получения одноцветных полей сравнения в фотометре со стороны лампы сравнения помещался выравнивающий фильтр.

Согласно данным измерений, изображенным на рис. 5, яркость лампы у электродных ее концов имеет наименьшее значение и, увеличиваясь по мере удаления от них, достигает своей наибольшей величины на расстоянии примерно 8—10 см от конца. Яркости исследованных типов ламп по абсолютным значениям различны. Так например, максимальная яркость, т. е. яркость средней части по длине для ламп завода МЭЛЗ на 20 W, 120 V равна 0,23 *сб*, для ламп Орион 15 W, 120 V—0,51 *сб* и для ламп Орион на 30 W, 220 V—0,79 *сб*. Те же зависимости, выраженные

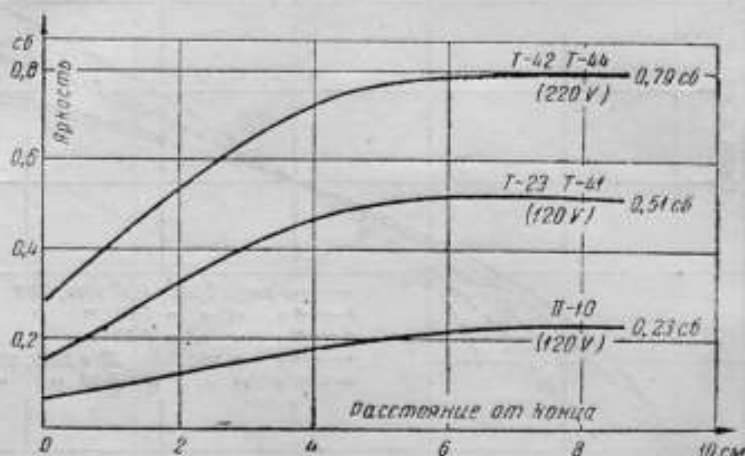


Рис. 5.

в процентах от наибольшего значения, показывают, что у ламп завода МЭЛЗ распределение яркости у конца несколько отличается от такового других ламп, а именно, яркость нарастает более медленно, однако начало участка с постоянной (наибольшей) яркостью у всех ламп отстоит от конца примерно на равных расстояниях.

Чтобы закончить рассмотрение основных световых свойств люминесцентных ламп, остается познакомиться с характером распределения относительной силы света в продольной и поперечной относительно оси колбы плоскостях. Соответствующие измерения были произведены с помощью селенового фотоэлемента и затем универсальным фотометром, причем эти приборы помещались на расстоянии 8—10 м от лампы. Лампа же находилась на поворотном устройстве, позволившем придавать ей любое нужное положение. Полученные обоими способами кривые распределения силы света ламп различных типов весьма близки между собой и имеют: продольная—вид эллипса, а поперечная—окружности.

На рис. 6 приведены продольные кривые распределения света, полученные как средние из значений для нескольких ламп одного и того же типа.

Срок службы люминесцентных ламп—относительно большой, достигая порой 8—10 тыс. часов (по литературным данным). Полученный в период выполнения настоящей работы материал недостаточно полный и не позволяет делать определенного вывода. В частности, установлено, что одна лампа Орион (15 W, 120 V) перегорела через 850 час., уменьшив перед этим свою относительную силу света примерно на 80%. Другая же подобная

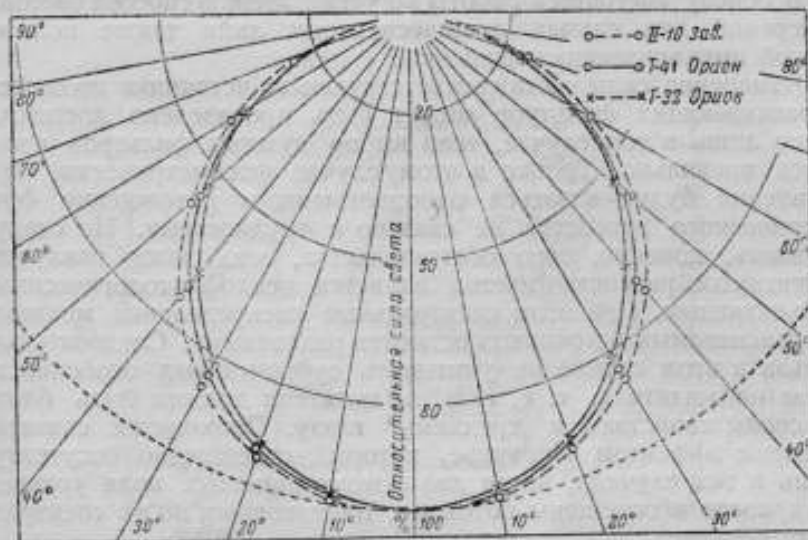


Рис. 6.

лампа перегорела через 5300 час., уменьшив свою относительную силу света на 90%.

Результат оказался в большом противоречии с литературными данными и даже если он является досадной, редкой случайностью, должен расцениваться как серьезное предостережение против чрезмерного оптимизма в оценке устойчивости и срока службы люминесцентных ламп вообще.

Распределение мощности по спектру у люминесцентной лампы резко отличается от такового у лампы накаливания, а потому сравнение между собой таких источников есть один из случаев разноцветных световых измерений.

Дело разноцветных световых измерений (имеющих сравнительно большую давность и целый ряд решений) обычно сводится прежде всего к выбору соответствующего метода, обоснованию его преимуществ перед другими методами и к уточнению над-

лежащих требований, от которых зависит точность полученного результата.

Опыт Фотометрической лаборатории ВНИИМ и обширный литературный материал, который в данном случае не разбирается, позволяют определенно утверждать, что вполне удовлетворительные результаты при фотометрировании разноцветных источников света получаются с использованием так называемого способа фильтров.

Как известно, в этом случае разноцветное световое измерение сводится к одноцветному в результате помещения перед одним из источников должным образом выбранного выравнивающего фильтра.

В основу настоящей работы по установлению способа световых измерений для случая люминесцентных ламп также положен способ выравнивающих фильтров.

Измерение силы света соответствующего источника по способу выравнивающих фильтров может быть произведено достаточно точно лишь в том случае, если выбор нужных фильтров произведен правильно. Только в этом случае фотометрические поля сравнения будут казаться одноцветными и нахождение фотометрического равенства не связано с трудностями. Не следует забывать, конечно, того обстоятельства, что даже наилучшее достигнутое равенство цветов является психофизиологическим и субъективным. При этом спектральные распределения мощности у сравниваемых источников остаются различными. Следовательно, нельзя в этом случае не учитывать субъективных особенностей глаза наблюдателя, т. е. глаз наблюдателя должен быть близок по своим свойствам к „среднему“ глазу. Приходится считать также с эффектом Пуркинье, который совершенно отсутствует лишь в тех случаях, когда два фотометрических поля уравнены по яркости и освещены потоками, одинаковыми по их спектральному составу.

Обычно присущая часто глазу асимметрия в отношении цветовой чувствительности по возможности также должна подлежать исключению или путем взаимного перемещения полей сравнения (например, поворотом светомерной головки на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной или вертикальной ее осей) или как-нибудь иначе.

Угловой размер фотометрического поля, обычно равный  $4-6^\circ$ , в данном случае также не может быть оставлен таким и должен быть порядка  $2^\circ$  (или немного больше). К этому обязывает то обстоятельство, что при подсчете общего коэффициента пропускания применяемого выравнивающего цвет фильтра у лампы сравнения приходится опираться на кривую видности для среднего глаза, полученную в свое время в условиях углового размера поля в  $2-3^\circ$ . Фотометрическое поле должно иметь яркость порядка  $0,4-0,6$  *мсб* и быть окруженным полем с близкой к нему по величине яркостью и имеющим угловой размер около  $20-25^\circ$ . Таковы обычные требования.

Выравнивающий фильтр, несомненно, может быть любого происхождения, т. е. жидким, пленочным или твердым (обычно стеклянным), но во многих отношениях предпочтительны сте-

клянные фильтры, как более стойкие. Спектральные коэффициенты пропускания фильтра должны быть известны с предельной точностью, ибо их значения непосредственно входят в расчет общего коэффициента пропускания (фильтра) и, следовательно, влияют на величину силы света той лампы сравнения, которая применяется при фотометрировании.

Зависимость коэффициента пропускания фильтра от длины волны целесообразно определять с помощью двойного монохроматора, обеспечивающего получение более чистых спектральных потоков. В настоящей работе для этой цели использовался двойной монохроматор (с двойной дисперсией), соединенный с фотоэлементом и усилителем, позволявшим производить измерения в пределах

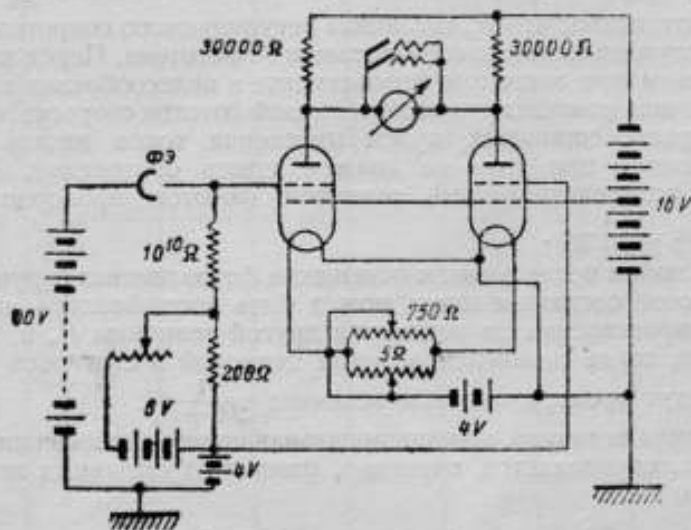


Рис. 7.

400—760 м $\mu$  с погрешностью, не превышающей 0,5—0,75% (при малых значениях коэффициента пропускания). Ширина объективной и окулярной щелей монохроматора была определена в длинах волн выделяемого ими участка спектра. Это было произведено как при относительно малых щелях, так и при относительно больших, так как последние оказались необходимыми при снятии спектральных кривых распределения лучистой мощности люминесцентных ламп, имеющих сравнительно низкую яркость.

Фотоэлемент с фотоусилителем помещены в общий металлический ящик, непосредственно установленный у выходной щели монохроматора. Фотоэлемент—щелочной, вакуумный, с максимумом спектральной чувствительности в области 640—680 м $\mu$ . Он соединен электрически с двухламповым усилителем, собранным по схеме моста.

В цепи фотоэлемента (рис. 7) имеются два последовательно соединенных сопротивления, одно из которых равно  $1,05 \cdot 10^{10} \Omega$

и другое  $200 \Omega$ , причем последнее служит для пропускания по нему компенсирующего тока, величина которого определяется вспомогательной батареей и регулируемым сопротивлением. Фототок, проходя по большому сопротивлению ( $1,05 \cdot 10^{10} \Omega$ ), создает на нем разность потенциалов, вызывающую нарушение предварительного (без освещения фотозлемента) установленного равновесного состояния моста. Чтобы восстановить это равновесие, необходимо указанную разность потенциалов скомпенсировать равновеликой ей и обратной по знаку, созданной на сопротивлении в  $200 \Omega$ . При неизменной величине напряжения вспомогательного источника в цепи компенсации величина компенсирующего тока обратно пропорциональна сопротивлению этой цепи, а именно  $\frac{1}{200 + R_x}$ , откуда очевидно, что  $R_x$  (величина регулируемого сопротивления) может служить мерой компенсированного фототока. Перед каждым измерением при закрытом фотозлемента и целесообразно выбранной величине компенсирующего темновой фототок сопротивления  $R_x$  мост уравнивается путем изменения токов накала ламп. Гальванометр при этом не должен давать отклонения. В этом случае скомпенсированный темновой фототок пропорционален величине  $\frac{1}{200 + R_x}$ .

При любом последующем освещении фотозлемента нарушенное равновесное состояние моста может быть восстановлено изменением сопротивления до некоторой другой величины  $R_x$  и, следовательно, тогда скомпенсированные темновой и световой фототок будут пропорциональны величине  $\frac{1}{200 + R_x}$ .

Искомая величина, пропорциональная степени освещения фотозлемента, определяется, очевидно, разностью указанных величин, а именно

$$\frac{1}{200 + R_x} - \frac{1}{200 + R_y} = \frac{R_y - R_x}{(200 + R_x)(200 + R_y)}$$

Нужно далее отметить, что в случае использования этой измерительной установки для определения коэффициента пропускания фильтра (или коэффициента отражения образца) приведенное только что соотношение приобретает иной вид.

Действительно, в этом случае в соотношении должны войти величины сопротивлений, обратно пропорциональные фототокам: темновому  $i_x$ , светловому без введенного в пучок фильтра  $i_0$  и светловому при фильтре  $i_y$ , т. е., например, коэффициент пропускания

$$\tau = \frac{(i_x - i_y)}{(i_0 - i_x)} = \frac{\frac{1}{200 + R_x} - \frac{1}{200 + R_y}}{\frac{1}{200 + R_x} - \frac{1}{200 + R_0}} = \frac{(R_y - R_x)(200 + R_0)}{(R_x - R_0)(200 + R_x)}$$

Наряду с определением кривых спектрального пропускания фильтров указанная установка служила также для определения

относительных кривых распределения лучистой мощности по спектру у люминесцентных ламп. Кривые распределения мощности у люминесцентных ламп служили средством для обоснованного выбора выравнивающих фильтров, нужных для выполнения световых измерений этих ламп.

Для решения поставленной задачи фотометрирования люминесцентных ламп представлялось правильным вести работу одновременно с несколькими характерными по спектральному составу излучения лампами, а потому были отобраны две лампы завода МЭЛЗ и три лампы фирмы Орион, часть которых была „дневного“ типа,

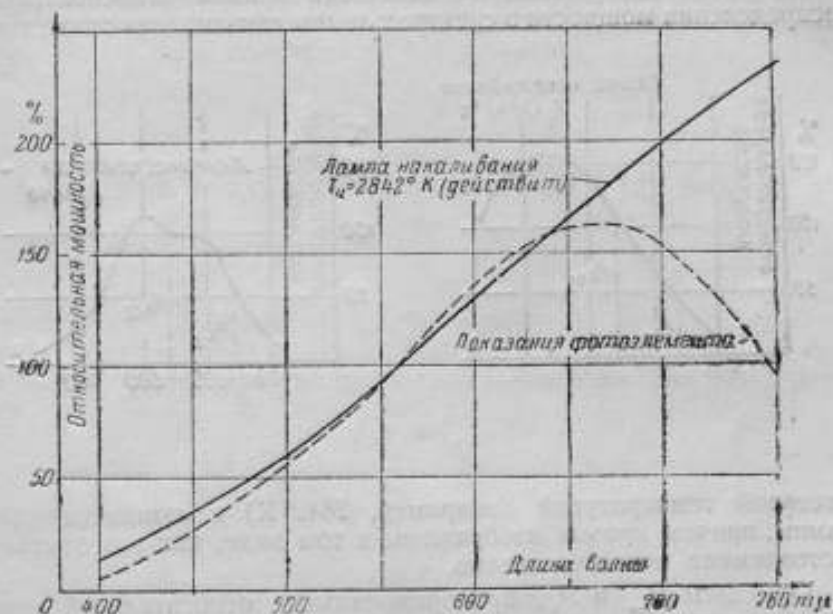


Рис. 8.

а остальные — „белого“. У этих ламп были определены кривые относительного распределения мощности по видимому участку спектра от 400 до 760 нм. Лампы для этого устанавливались непосредственно перед объективной щелью монохроматора и при этом всякий раз проверялась полнота заполнения действующего отверстия коллиматорной линзы.

Чтобы не снижать точности измерений и иметь поступающие на фотоэлемент спектральные потоки сравнительно большими, входная и выходная щели двойного монохроматора были взяты размером по 0,3 мм (средняя же щель имела размер в 0,5 мм). Щели указанной величины определяют размер выделяемого ими спектрального участка примерно в 4 нм на длинноволновом и в 1 нм на коротковолновом концах спектра.

Произведенные через промежутки в 10 нм измерения каждой лампы дали значения, пропорциональные мощности излучения лампы при соответствующих длинах волн.

Далее надлежало на том же приборе измерить относительное спектральное распределение мощности у источника, для которого оно было известным. В качестве такого была взята лампа накаливания с известной цветовой температурой—2842° К. По данным измерений получены кривые, изображенные на рис. 8. Неоднократно произведенные измерения дали довольно устойчивые значения.

На рис. 9 изображены схематически кривые относительного распределения мощности в спектрах лампы накаливания с известной

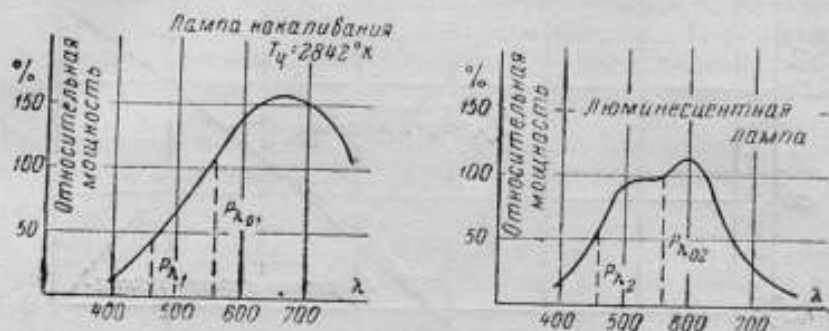


Рис. 9.

цветовой температурой (например, 2842° К) и люминесцентной лампы, причем кривые изображены в том виде, как это отмечает фотоземлет непосредственно.

Ординаты  $P_{\lambda_{01}}$  и  $P_{\lambda_{02}}$ , пропорциональные относительной мощности излучения лампы накаливания, отвечают значениям фото-токов  $i_{\lambda_{01}}$  и  $i_{\lambda_{02}}$ , которые могут быть выражены соответственно через

$$i_{\lambda_{01}} = k_{\lambda_{01}} c_1 P_{\lambda_{01}} \quad \text{и} \quad i_{\lambda_{02}} = k_{\lambda_{02}} c_1 P_{\lambda_{02}},$$

где  $k_{\lambda_{01}}$  и  $k_{\lambda_{02}}$ —коэффициенты, учитывающие спектральную чувствительность фотоземлет и пропускание (с учетом дисперсии и ширины щели) монохроматора для длин волн  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$ , а  $c_1$ —коэффициент пропорциональности.

Так как измерения являются относительными, то можно написать для любой длины волны  $\lambda$

$$\frac{i_{\lambda_1}}{i_{\lambda_0}} = \frac{k_{\lambda_1}}{k_{\lambda_0}} \cdot \frac{P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_0}}. \quad (1)$$



В случае люминесцентной лампы, рассуждая аналогичным образом, имеем для длины волны  $\lambda_2$

$$i_{\lambda_2} = k_{\lambda} c_2 P_{\lambda_2}$$

Отношение фототоков при люминесцентной лампе и при лампе накаливания дает

$$\frac{i_{\lambda_2}}{i_{\lambda_1}} = \frac{c_2 P_{\lambda_2}}{c_1 P_{\lambda_1}}, \quad (2)$$

что будет справедливо и для любой длины волны по спектру. Распределение лучистой мощности в спектре люминесцентной лампы может быть получено из соотношения:

$$\frac{P_{\lambda_2}}{P_{\lambda_1}} = \frac{i_{\lambda_2}}{i_{\lambda_1}}$$

Перемножим между собой выражения (1) и (2); тогда

$$\frac{i_{\lambda_2}}{i_{\lambda_1}} = \frac{c_2}{c_1} \cdot \frac{k_{\lambda}}{k_{\lambda_0}} \cdot \frac{P_{\lambda_2}}{P_{\lambda_1}}$$

Отношение коэффициентов, учитывающих чувствительность фотозлемента и пропускание монохроматора, из полученного соотношения исключается подстановкой выражения для него, равного

$$\frac{k_{\lambda}}{k_{\lambda_0}} = \frac{i_{\lambda_1}}{i_{\lambda_0}} \cdot \frac{P_{\lambda_0}}{P_{\lambda_1}}$$

Тогда

$$\frac{i_{\lambda_2}}{i_{\lambda_1}} = \frac{c_2 i_{\lambda_1} P_{\lambda_0} P_{\lambda_2}}{c_1 i_{\lambda_0} P_{\lambda_1} P_{\lambda_1}}$$

откуда

$$\frac{P_{\lambda_2}}{P_{\lambda_1}} = \frac{c_1 i_{\lambda_2} P_{\lambda_1}}{c_2 i_{\lambda_1} P_{\lambda_0}} = c_3 \frac{i_{\lambda_2}}{i_{\lambda_1}} \frac{P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_0}}$$

где  $c_3$  — коэффициент пропорциональности (масштаб кривой), а отношение  $\frac{P_{\lambda_1}}{P_{\lambda_0}}$  известно при лампе с известной температурой.

Анализ распределения мощности в видимой области спектра люминесцентной лампы показывает, что на сплошной спектр излучений люминофора наложены ртутные спектральные линии 404,7—404,8; 435,8; 546,1 и 577—579 мμ.

Яркость этих спектральных линий весьма значительна и их влияние как на цвет излучения лампы, так и на величину светового потока ее безусловно существенно. Влияние этих четырех линий должно учитываться при определении цветных координат,

для чего прежде кратко установим общий ход подсчета мощности их. Мощность излучений, заключенная в четырех спектральных линиях, оцениваемая фотоэлементом при монохроматоре, выражается в следующем виде:

$$P_{\text{линии}} = \delta \sum_1^4 k_{\lambda} i_{\lambda},$$

где  $\delta$  — участок (в длинах волн) спектра, выделяемый при измерениях мощности спектральных линий (входная и выходная щели одинаковы);

$i_{\lambda}$  — фототок;

$k_{\lambda}$  — коэффициент пропорциональности.

Мощность излучений, заключенная в сплошном спектре, выражается

$$P_{\text{сплошн.}} = \int_{\lambda=400}^{\lambda=760} P_{\lambda} \cdot d\lambda = \Sigma P_{\lambda} \cdot \Delta\lambda.$$

Последующие расчеты (интегрирование) целесообразно вести для интервала длин волн  $\Delta\lambda = 10$  м $\mu$ . Выделяемый щелью монохроматора при измерениях участок спектра, например, был равен 2 м $\mu$ ; поэтому  $\Delta\lambda$  можно заменить выражением  $\Delta\lambda = 5\delta$ . Следовательно,

$$P_{\text{сплошн.}} = \sum_1^{36} 5\delta \cdot P_{\lambda} = 5\delta \sum_1^{36} P_{\lambda} = 5\delta \sum_1^{36} k_{\lambda} \cdot i_{\lambda}.$$

Суммируя в отдельности мощность излучения сплошного спектра, а затем мощность спектральных линий, необходимо помнить, что в последнем случае учету подлежат значения, выраженные разностью фототоков ( $i_{\lambda} - i'_{\lambda}$ )  $k_{\lambda}$ , так как при измерении мощности линии по неизбежности одновременно измерялась и некоторая доля сплошного спектра.

При построении кривых распределения энергии лампы по спектру и наложенных на эти кривые спектральных линиях (в одном масштабе) требуется значения разности ( $i_{\lambda} - i'_{\lambda}$ ) уменьшать в отношении  $\frac{\Delta\lambda}{\delta}$ , т. е. в данном случае, как примере, это отношение будет

$$\frac{10}{2} = 5.$$

При измерениях распределения мощности в спектре через интервалы в 10 м $\mu$  и в силу особенностей используемого приема для этих измерений спектральные линии оставались необнаруженными. Последние находились и относительная их мощность измерялась непосредственно после измерений по сплошному спектру несколько иным путем. Медленно поворачивая призмы монохроматора и поддерживая одновременно равновесное состояние моста усилительной схемы, находили то положение бара-

бана и, следовательно, то значение соответствующей ему длины волны, которое отвечало максимуму (скомпенсированного) фототока, присущего данной спектральной линии.

Построение кривых относительного распределения мощности люминесцентных ламп с учетом спектральных линий произведено в соответствии с положением, согласно которому площадь выступающего над кривой сплошного спектра столбика пропорциональна заключенной в спектральной линии относительной мощности, отнесенной к расчетному участку спектра в 10 мк.

На рис. 10 и 11 приведены кривые распределения мощности, построенные по данным измерений и отнесенные к значению при 560 мк, принятому за 100%.

Полученные таким путем кривые относительного распределения мощности в спектре позволили в дальнейшем сделать на основании их ряд выводов, основными из которых были расчет координат цвета ламп и подбор соответствующих фильтров для создания возможно лучших условий при фотометрировании ламп. Влияние спектральных линий в лампе на результаты расчета цвета ее и на значение светового потока совершенно различно.

Из приведенных в табл. 1 значений относительной видности для длин волн, отвечающих местоположению линий в спектре, следует, что в отношении влияния на величину общего светового потока лампы наиболее существенна роль линии 546,1 мк.

Таблица 1

| Длина волны спектральной линии | Относительная видность |
|--------------------------------|------------------------|
| 404,8                          | 0,0007                 |
| 435,8                          | 0,018                  |
| 546,1                          | 0,984                  |
| 577—579                        | 0,889                  |

С другой стороны, влияние фиолетовой и синей спектральных линий на цвет излучаемого лампой света весьма значительно. Интересно здесь сопоставить полученные значения относительной лучистой мощности четырех спектральных линий с значениями, указанными в ряде литературных источников для нелюминесцентной ртутной лампы низкого давления.

В табл. 2 приведено такое сопоставление.

Таблица 2

| Длина волны спектральной линии | Относительная лучистая мощность, % |       |       |       |       | литературные данные |
|--------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
|                                | тип люминесцентной лампы           |       |       |       |       |                     |
|                                | T-23                               | T-41  | T-32  | IX-4  | II-10 |                     |
| 404,8                          | 15,5                               | 15,6  | 16,1  | 16,5  | 14,6  | 64,0                |
| 435,8                          | 105,4                              | 105,5 | 107,5 | 113,2 | 121,0 | 106,0               |
| 546,1                          | 100,0                              | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0               |
| 577—579                        | 29,4                               | 28,4  | 35,7  | 38,0  | 31,1  | 34,0                |

Рис. 10 и 11 позволяют констатировать наличие двух различающихся по спектральному составу типов ламп — „белых“ и

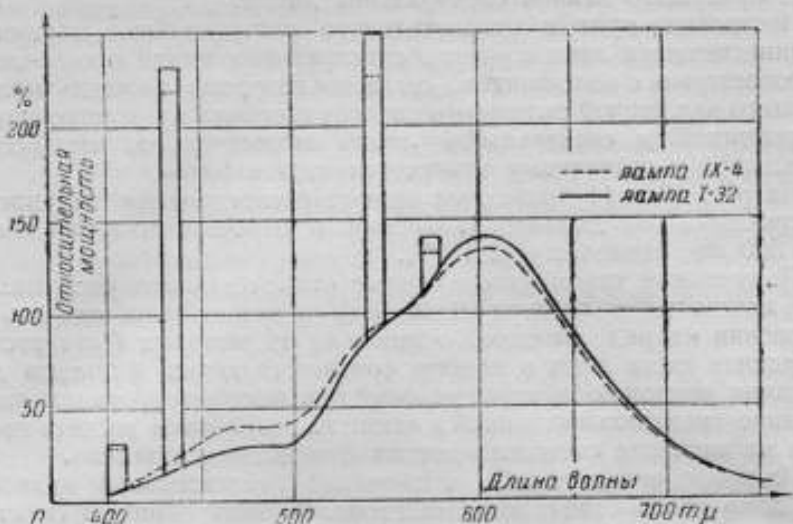


Рис. 10.

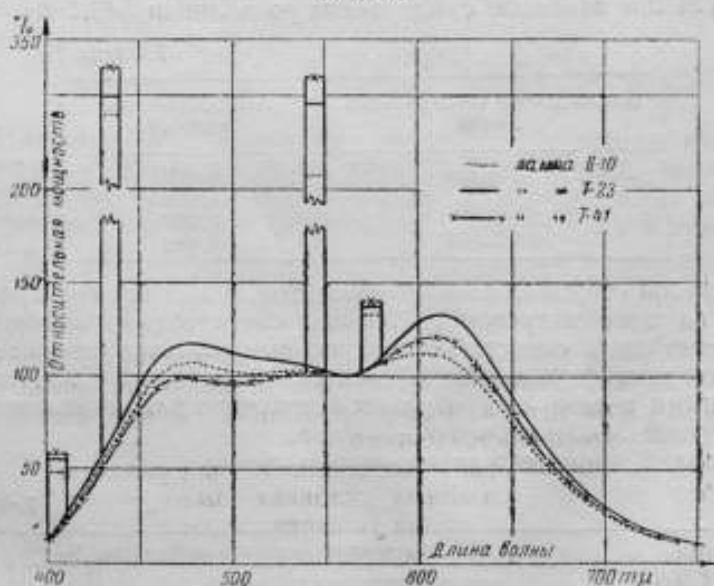


Рис. 11.

„дневных“. К одному из них, имеющему лишь один максимум с длиной волны 610 нм, относятся лампы Т-32 фирмы Орион и лампа IX-4 завода МЭЛЗ, к другому же, имеющему наряду с таким же максимумом еще другой — с длиной волны около 480 нм, — лампы Т-23 и Т-41 фирмы Орион и лампа II-10 завода

МЭЛЗ. Повидимому, в первом случае в лампах, называемых обычно „белыми“, применен в качестве люминофора один цинк-бериллийселикат ( $ZnBeSiO_3$ ), тогда как во втором—лампах дневного света—смесь того же вещества с вольфраматом магния ( $MgWO_4$ ).

Решение использовать полученные экспериментально кривые относительного распределения мощности ламп для обоснования дальнейших выводов обязывает несколько остановиться на вопросе надежности данных эксперимента.

Об устойчивости произведенных измерений свидетельствует тот факт, что разница в результатах, полученных многократно и, в частности, при измерениях, разделенных промежутком времени в 3 месяца и произведенных при несколько различающихся условиях, не превышает 2—3%.

Для выяснения влияния искажения формы кривой питающего лампы переменного тока на характер распределения мощности в спектре лампы у одной из ламп (Т-41) было найдено распределение для случаев питания лампы непосредственно от сети и затем через посредство феррорезонансного стабилизатора напряжения. На рис. 12 даны кривые, отвечающие этим двум случаям. Можно видеть, что несколько искаженная стабилизатором форма кривой напряжения и тока вызвала некоторое снижение величин излучаемой мощности в области примерно 400—590  $m\mu$  и не повлияла на излучения в остальной длинноволновой части видимого спектра. Следовательно, относительно небольшое искажение формы кривой питающего напряжения, с которым практически приходится встречаться, не способно внести заметных изменений.

Фотоэлемент и усилитель при нем, строго говоря, находились в различных условиях работы при измерениях относительного распределения мощности у лампы накаливания и у люминесцентной лампы. В первом случае на фотоэлемент воздействовал постоянный по величине световой поток (лампа питалась постоянным током), во втором случае—этот световой поток был переменным во времени с удвоенной частотой сети. Каждый фотоусилитель, как известно, имеет определенную частотную характеристику, ставящую некоторые ограничения области нормальной работы его, а потому в данном случае нельзя было пройти мимо этого обстоятельства.

Чтобы установить факт одинаковости или различия в работе фотоусилителя при указанных условиях, было произведено следующее. У лампы накаливания (с цветовой температурой 2842° K) измерялось относительное распределение мощности для случаев питания этой лампы постоянным током (от аккумуляторной батареи) и затем от сети переменного тока. Измерения производились дважды, причем величина подводимого к лампе напряжения поддерживалась постоянной и контролировалась электродинамическим вольтметром. Параллельно то же самое было проведено и при вакуумной лампе (мощностью 50 W) из тех соображений, что колебание светового потока, как известно, при вакуумной лампе малой мощности обнаруживается в большей степени.

Результаты этих серий измерений позволяют утверждать, что в обоих случаях фотоусилитель работает вполне одинаково и, следовательно, сделанные в работе сопоставления результатов также не содержат заметных ошибок. Помимо этого, для выяснения вопроса точности измерений, произведенных на упомянутой установке, были сделаны специальные контрольные исследования, характеризующие устойчивость результата.

Измерялся коэффициент пропускания нейтрального фильтра при одной определенной длине волны последовательно 24 раза (в течение 72 мин. с промежутком времени около 3 мин. между смежными измерениями). При этом наблюдалось незначительное идущее в одну сторону изменение величины сопротивления в цепи компенсации, объясняющееся недостаточностью емкости источников питания схемы усилителя и температурными изменениями.

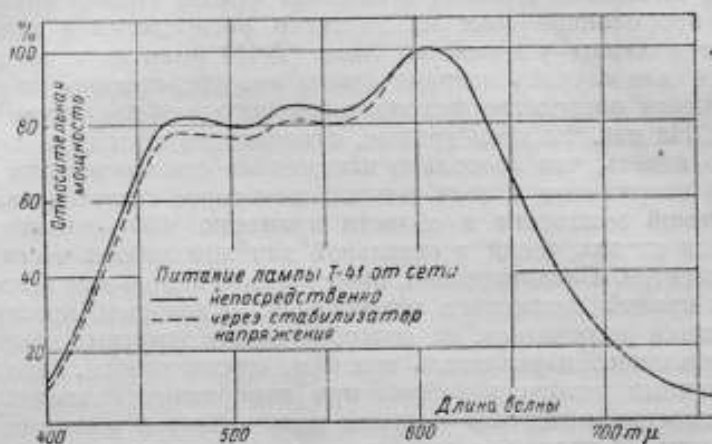


Рис. 12.

Однако это не повлияло на конечные результаты измерений коэффициента пропускания. Из полученных результатов, обработанных известным образом, найдено, что максимальная остаточная погрешность отсчета не превышала 2%, средняя же квадратичная погрешность ряда измерений оказалась равной 0,75%.

Подбор выравнивающих фильтров был произведен следующим путем. Рядом предварительных грубых проб удалось установить, что возможно ожидать удовлетворительных результатов выравнивания цвета полей сравнения при фотометрировании люминесцентных ламп, используя лампу накаливания с цветовой температурой 2842° К при голубом стекле марки СС-2 (Ижумского завода). Поэтому у четырех имевшихся в распоряжении фильтров этой марки с толщиной 0,59, 1,12, 2,06 и 3,10 мм были тщательно определены кривые пропускания по спектру [ $\tau = f(\lambda)$ ] (рис. 13).

Кривые, естественно, расположились вполне закономерно, причем значения коэффициента пропускания для концов спектра

( $\lambda=400$  мк и  $\lambda=760$  мк) примерно равны между собой и мало изменяются с толщиной. По найденным значениям для фильтров при источнике с цветовой температурой 2842°К (источник А)

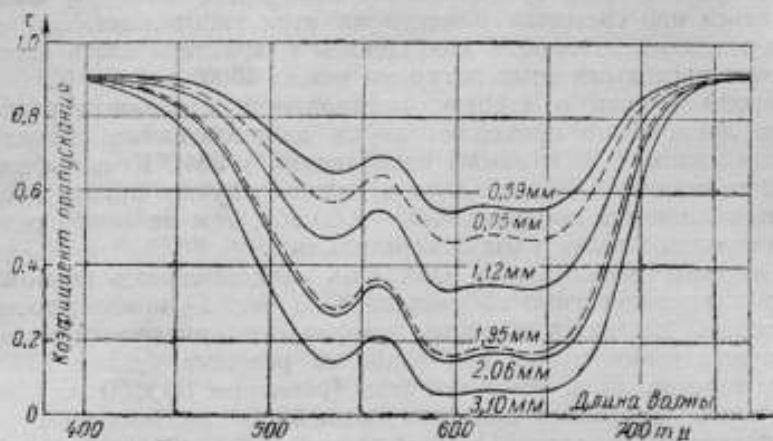


Рис. 13.

подсчитывались цветные координаты, которые в системе ХУ определили точки, расположившиеся на кривой, близко прохо-

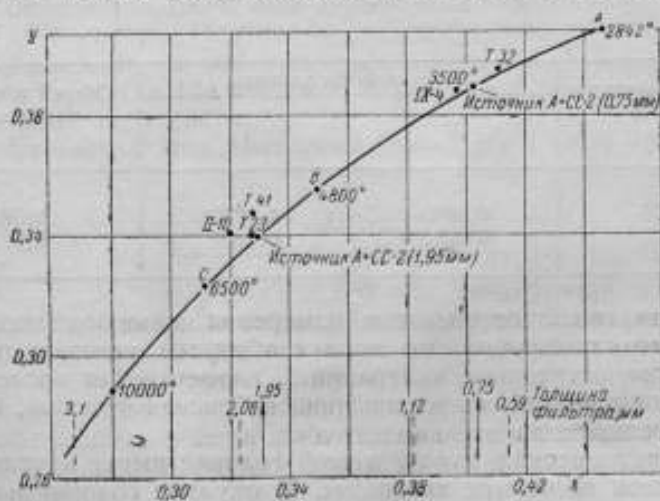


Рис. 14.

дящей к кривой черного тела в той же системе. В то же время точки, характеризующие цвет измеряемых люминесцентных ламп и полученные расчетом по кривым относительного распределения мощности (с учетом спектральных линий), оказались несколько смещенными в одну сторону относительно упомянутой кривой (рис. 14).

Местоположения цветовых точек для люминесцентных ламп Т-41, Т-23 и П-10 („дневных“), с одной стороны, и для ламп Т-32 и IX-4 („белых“), с другой,—весьма различны и потому свидетельствуют о том существенном отличии, с которым следует считаться при световых измерениях этих типов ламп. Эти типы ламп можно с известным допущением охарактеризовать соответственно цветовыми температурами около 3500° и 5600° К.

Чтобы судить о степени правильности сделанных расчетов цвета лампы, было проверено двумя наблюдателями совпадение цветов лампы Т-23 и лампы накаливания с 2842° К при фильтре СС-2 толщиной 2,06 мм. Хотя в данном случае фильтр должен иметь толщину в пределах 1,95—2,00 мм, тем не менее результат оказался вполне удовлетворительным.

Толщины необходимых фильтров представлялось возможным найти непосредственно по указанной на рис. 14 кривой, воспользовавшись для этого обычным графическим интерполированием. Установив таким путем эти толщины равными 1,95 и 0,75 мм, затем изготовили и сами фильтры (размером 50×50 мм), которые и использовались при всех дальнейших световых измерениях люминесцентных ламп. Предварительно оба эти фильтра были тщательно промерены (рис. 13) на двойном монохроматоре и для них подсчитаны общие коэффициенты пропускания и цветовые координаты при источнике с 2842° К. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Толщина фильтра<br>СС-2<br>мм | Цветовые координаты |        | Общий коэффициент<br>пропускания<br>$\tau$ |
|-------------------------------|---------------------|--------|--|
|                               | X                   | Y      |  |
| 0,75                          | 0,4045              | 0,3892 | 0,5629                                     |
| 1,95                          | 0,3317              | 0,3406 | 0,2712                                     |

Предварительные световые измерения производились световой головкой обычного типа с обычным угловым размером поля и при отсутствии контрастных пластин. Для последующих измерений применялась специально собранная головка, имевшая ряд особенностей.

Фотометрический кубик в этой головке имеет круглое поле, разделенное на четыре квадранта. В окуляре головки находится поворотная несимметричная оптическая система, позволяющая рассматривать поочередно любой из квадрантов. Головка допускает измерения путем сравнения равнояркостных полей. Кроме того, она применяется как смешивающий фотометр.

Угловой размер поля был равен 1,5—2°. Фотометрическое поле окружено светлым полем адаптации с угловым размером до 60°, причем яркость этого поля могла произвольно изменяться. При измерениях величина яркости поля адаптации устанавлива-



лась примерно одинаковой с яркостью сравниваемых фотометрических полей в положении равенства их (порядка 0,2—0,4 мсб).

Расстояние от светомерной головки до измеряемой лампы равнялось 3,0—3,5 м. При размерах ламп Орион длиной 42 см и завода МЭЛЗ длиной 57 см имели место 8- и 5-кратные соотношения с расстоянием, что позволяло считать поправку к закону квадратов практически малой.

Положение выравнивающего фильтра со стороны лампы сравнения было выбрано с учетом недопустимости нахождения его как у лампы, вследствие неизбежного нагрева его, так и у экрана светомерной головки, что внесло бы ошибку за счет многократных отражений. Фильтр был помещен на расстоянии 15 см от экрана, будучи жестко скрепленным со светомерной головкой.

Чтобы судить все же о величине той ошибки, которую допустили бы, помещая фильтр непосредственно у головки, т. е. на расстоянии около 5 см от экрана (что удобно вследствие своей простоты),—были проведены сравнительные измерения для того и другого случаев. Оказалось, что влияние дополнительного подсвечивания экрана составляет величину порядка 0,2%.

При измерениях все лампы включались в сеть через контакты, размещенные на колбе накрест. Следует отметить при этом, что измерения силы света лампы, включенной таким образом и допустимым другим, не дали заметной разницы в результатах. Сила света лампы сравнения (без фильтра перед ней) была предварительно определена сравнением с рабочими эталонами и оказалась равной 1176 свечам. Измерения силы света люминесцентных ламп производились двумя наблюдателями, каждый из которых давал по две группы (из 10) отсчетов, отвечающих положениям фотометрического неравенства.

Сводка результатов измерений приведена в табл. 4.

Таблица 4

| Наблюдатель                         | Сила света лампы |      |       |      |      |
|-------------------------------------|------------------|------|-------|------|------|
|                                     | T-23             | T-41 | II-10 | T-32 | IX-4 |
| А.М.С. . . . .                      | 66,6             | 64,2 | 69,9  | 75,8 | 76,5 |
| Н.В.Л. . . . .                      | 66,4             | 64,7 | 70,7  | 77,0 | 78,2 |
| Среднее . . . . .                   | 66,5             | 64,5 | 70,3  | 76,4 | 77,4 |
| Отклонение от среднего, % . . . . . | 0,2              | 0,4  | 0,6   | 0,8  | 1,1  |

Измерение силы света люминесцентных ламп основных двух типов („дневных“ и „белых“) описанным способом не сопряжено с большими трудностями для наблюдателя, чем при фотометри-

ровании одноцветных источников. Такой вывод делается на основании заключения пяти наблюдателей.

Использование светомерного шара для определения светового потока люминесцентных ламп через светозмерительные электрические лампы накаливания связано с необходимостью учета небелизны окраски шара. Это вызывается значительным различием в спектральном распределении мощности у обоих типов ламп. В противном случае, для определения светового потока поверяемых люминесцентных ламп необходимо пользоваться светозмерительными люминесцентными же лампами того же типа. Световой поток последних должен быть определен ранее через их продольные кривые распределения света.

Избирательность отражения внутренней окраски шара может быть определена и учтена, но это определение технически не столь просто. Целесообразнее представляется измерение с использованием люминесцентных ламп, являющихся светозмерительными. Нельзя забывать, что при лампах, имеющих значительную длину, измерения в шаре не обеспечивают большой точности. Нельзя забывать и о том, что при измерениях в шаре в обоих упомянутых случаях перед лампой сравнения (с нитью накаливания) необходимо опять-таки помещать выравнивающий фильтр, подбор которого возможен лишь чисто опытным путем. По ряду соображений казалось правильным пойти по пути предварительного определения светового потока люминесцентных ламп из продольных кривых распределения силы света, что позволяет в дальнейшем использовать эти лампы в шаре в качестве светозмерительных при измерении светового потока других ламп аналогичных по цвету типов.

В литературе нашло отражение исследование характера продольных кривых распределения силы света у люминесцентных ламп различной длины и диаметра. Установлено, что для этих ламп относительные кривые распределения весьма похожи. Отношение величины светового потока лампы к силе света ее под тем или иным углом к оси лампы остается весьма постоянным для ламп различной длины, что дает возможность легко переходить от силы света лампы к световому потоку ее. Очевидно, правильнее это делать для случая известной наибольшей силы света лампы, — в направлении, перпендикулярном к оси лампы.

При настоящей работе определение светового потока через продольные кривые распределения силы света пяти люминесцентных ламп производилось на установке с большим распределительным фотометром, надлежащим образом для этого приспособленным. Поворотное плечо фотометра, несущее на своем конце белую пластину, имело длину около 2 м. Лампой сравнения служила опять-таки светозмерительная лампа с цветовой температурой 2842° К, со стороны которой помещался тот или другой из подобранных ранее голубых фильтров.

Сила света лампы сравнения, аналогично предыдущему, была определена сличением ее с двумя рабочими эталонами. Измерение силы света у каждой люминесцентной лампы производилось

последовательно через  $10^\circ$  двумя наблюдателями. Точность измерений была несколько пониженной для углов, близких к  $90^\circ$  с нормалью, вследствие малой яркости полей сравнения.

Результаты измерений приведены в табл. 5.

Таблица 5

| Общий световой поток | Л а м п ы |      |      |      |      |
|----------------------|-----------|------|------|------|------|
|                      | T-23      | T-41 | И-10 | T-32 | IX-4 |
| Люмены . . . . .     | 621       | 598  | 643  | 698  | 678  |

В табл. 6 сопоставлены значения силы света люминесцентных ламп по измерениям на скамье и на распределительном фотометре. Среднее расхождение для всех ламп вместе взятых  $-0,5\%$ .

Таблица 6

| Измерено                                 | Сила света лампы |            |                   |            |                   |
|--|------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
|  | T-23             | T-41       | И-10              | T-32       | IX-4              |
| На скамье . . . . .                      | 66,5             | 64,5       | 70,3              | 76,4       | 77,4              |
| На распределительном фотометре . . . . . | 68,5             | 64,5       | 65,6 <sup>1</sup> | 79,3       | 72,8 <sup>1</sup> |
| Среднее . . . . .                        | 67,5             | 64,5       | 68,0              | 77,8       | 75,1              |
| Отклонение от среднего, % . . . . .      | $\sim 1,5$       | $\sim 0,0$ | $\sim 3,5$        | $\sim 1,8$ | $\sim 3,0$        |

<sup>1</sup> Уменьшена за счет экранировки концов лампы.

Все ранее сказанное далеко не в полном объеме охватывает выполненные исследования с люминесцентными лампами. Но выводы, приводимые ниже, содержат и некоторые неохваченные стороны вопроса.

### Выводы

1. Вопрос световых измерений люминесцентных ламп, как случай явно выраженных разноцветных измерений, согласно произведенной работе разрешается в достаточной мере использованием способа выравнивающих цвет фильтров, при соблюдении присущих ему основных требований для обеспечения должной точности. Этими требованиями являются: угловой размер фотометрического поля, не больший  $1,5-2^\circ$ , яркость этого поля около  $0,4-0,6 \text{ мсб}$  при наличии периферического светлого

поля адаптации с близкой к фотометрическому полю яркостью и с угловым размером не менее  $30^\circ$ .

2. Относительная кривая спектрального распределения лучистой мощности люминесцентной лампы, полученная непосредственным измерением, и рассчитанные по ней цветовые координаты являются достаточным критерием для оценки правильности выбора выравнивающего фильтра, делая этот выбор обоснованным теоретически и оправданным с психо-физиологической стороны.

Стекла, изготовлявшиеся ранее Изюмским заводом оптического стекла, а именно сорта СС-2, при подборе подходящей температуры у лампы накаливания меняют окраску света последней настолько удовлетворительно, что получается почти полное совпадение цвета с таким же от люминесцентной лампы. При цветовой температуре лампы в  $2842^\circ\text{K}$  стекло толщиной  $0,75\text{ мм}$  изменяет ее цвет до  $3500^\circ\text{K}$ , что отвечает люминесцентным лампам „белого“ света. Стекло же толщиной в  $1,95\text{ мм}$  изменяет цвет до  $5600^\circ\text{K}$ , что отвечает люминесцентным лампам „дневного“ света. Фильтров такого сорта с указанными двумя толщинами оказывается достаточно для обеспечения нормальных условий при световых измерениях основных типов ламп, учитывая и неизбежную неоднородность ламп по цвету, которую пришлось наблюдать.

Вместо точной подгонки толщины стекла можно подгонять цветовую температуру лампы накаливания.

3. Относительное распределение лучистой мощности по спектру у люминесцентной лампы с достаточной для практики точностью (порядка  $3\%$ ) может быть определено путем сравнения с помощью монохроматора с таковым у образцовой лампы с известной цветовой температурой. Для повышения точности следует помимо других средств применять образцовые лампы накаливания с известным распределением лучистой мощности по спектру.

4. Люминесцентные лампы могут применяться в качестве светоизмерительных при использовании как на светомерной скамье (или распределительном фотометре и т. п.), так и в светомерном шаре. Продолжительность применения их между двумя поверками может быть оценена примерно в  $30-50$  час., что соответствует уменьшению светового потока на  $0,3-0,5\%$ . Лампа предварительно отжигается в течение  $100$  час. Внешним признаком старения лампы является образование темного налета на стеклянной трубке, вблизи от электродов. Лампы с налетом не должны применяться в качестве светоизмерительных.

Световые и геометрические размеры светоизмерительных ламп должны быть одинаковы с размерами тех ламп, которые измеряются, чтобы можно было применять способ замещения.

Вопрос о применении люминесцентных ламп в качестве образцовых светоизмерительных пока еще не может быть решен положительно (по крайней мере до достижения полной устойчивости в производстве люминесцентных ламп). Поэтому в ближайшие

годы в качестве образцовых следует применять лампы накаливания с голубым (или синим) стеклом (сорта СС-2).

5. Точные световые измерения люминесцентных ламп предпочтительно выполнять при одноцветных полях сравнения, полученных в условиях пп. 2 и 4.

6. Сила света люминесцентной лампы может быть вычислена по измеренной освещенности с введением поправки на размеры лампы. Такие поправки обыкновенно вычисляются в предположении, что удельная сила света меняется по закону косинуса. В действительности этого нет, но погрешности подсчетов допустимы для практики.

Что касается отступления от закона косинуса, то некоторые данные произведенных измерений приводятся в табл. 7.

Таблица 7

| Направление удельной силы света (считая от перпендикуляра к оси лампы); градусы | Отступление от закона косинуса, % |
|---|-----------------------------------|
| 10  | -1,0                              |
| 20  | -2,5                              |
| 30  | -5,0                              |

7. Для точных измерений световой поток люминесцентных ламп следует определять на распределительном фотометре. Со светоизмерительными лампами так и надо поступать. Лампы, измеренные таким путем, могут затем применяться для сравнения с ними других испытываемых в светомерном шаре, если лампы близки по размерам и по спектру.

Замечено, что у люминесцентных ламп всех размеров существует довольно постоянное отношение светового потока к поперечной силе света. Поэтому для надобностей практики световой поток (в люменах) может быть вычислен, если измеренную поперечную силу света (в свечах) умножить на 9,25. Этот переходный коэффициент достоверен в пределах  $\approx 1-2\%$ .

8. Яркость люминесцентных ламп несколько меняется с изменением направления наблюдения, поэтому правильнее характеризовать их светность. Светность вычисляется путем определения светового потока, испускаемого с известной площади.

9. Селеновые фотоэлементы, применяемые для измерения освещенности от люминесцентных ламп, должны поверяться при люминесцентных лампах с тем же спектральным распределением. При этом измерительный прибор у фотоэлемента, естественно, не должен быть заменяем. Следует определять нижнюю и верхнюю границы прямой пропорциональности тока и освещенности.

Селеновый люксметр без компенсационного фильтра, поверенный при свете электрической лампы накаливания, при освещении люминесцентными лампами может изменять свои показания примерно на 15%.

10. Форма кривой переменного электрического напряжения, подводимого к люминесцентной лампе со вспомогательными ее принадлежностями (индуктивное сопротивление, емкость), при измерениях должна быть возможно приближающейся к синусоидальной.

Рекомендуется пользоваться потенциометрами переменного тока или же динамометрическими амперметрами и ваттметрами и электростатическими вольтметрами (особенно при измерении напряжения у самой лампы). Приборы эти должны быть поверены и точность их определена. Защита приборов от внешних электрических и магнитных полей безусловно необходима.

---

Работа выполнена при частичном руководстве проф. П. М. Тиходеева и при некотором участии Н. В. Лобановой и Е. Н. Юстовой.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

(в применении к люминесцентным лампам)

### Введение

Измерения меняющихся во времени световых величин представляют собой сравнительно трудную (в отдельных случаях) задачу, притом мало или даже совсем не освещенную с метрологической стороны. Связанные с исследованием источников света, имеющих непостоянный световой поток, подобные задачи возникали давно и так или иначе решались, однако в большинстве своем—при отсутствии больших требований к точности соответствующих измерений.

На практике встречаются источники света с периодически меняющимся световым потоком и с потоком, меняющимся аperiodически. Источниками первого рода являются питающиеся от сети переменного тока электрические лампы накаливания и различные газосветные лампы (включая и дуговые). Ко второму роду источников приходится отнести все виды осветительных ракет, специальные сигнальные огни и электрические лампы для фотовспышек.

Лампы накаливания, работающие на переменном токе, достаточно полно исследованы, чему, в частности, в значительной мере способствовали повышенные требования к таким лампам при их использовании в кино. Для этого случая внесена достаточная ясность как в методику исследования, так и в определения основных понятий, характеризующих процесс изменения световой величины, при наблюдении приемлемой для практики точности.

В этом отношении исследование газосветных источников света менее полно и, в частности, мало соответствующих данных для люминесцентных ламп, имеющих, с одной стороны, пока ограниченную давность использования, а с другой стороны—перспективы широкого распространения.

В основу настоящей работы по измерению переменных световых величин положены надлежащие исследования и измерения в применении именно к люминесцентным лампам. Эта работа, как предполагалось, поможет разработке соответствующей методики, обеспечивающей измерения с точностями, удовлетворяю-

щими нужды метрологической практики. Вместе с тем учитывалось также, что для случая люминесцентной лампы вопрос измерения переменной световой величины оказывается осложненным в силу резкого колебания спектрального состава излучения за период его изменения. С последним обстоятельством практически допустимо не считаться при лампах накаливания, но совершенно нельзя не учитывать этого в ряде других случаев, когда приходится сталкиваться с разноцветными измерениями.

Наряду с указанными соображениями признавалось необходимым помочь практике в разработке и освоении весьма нужных измерений. Надо иметь в виду, что мигание люминесцентных ламп и так называемый „стробоскопический эффект“ (как следствие мигания) являются существенными их недостатками, с которыми техника еще как следует не справляется. Поэтому улучшение относящихся сюда измерений крайне нужно. Непосредственно отсюда возникает вопрос и о разработке способов проверки светоизмерительных приборов, применяемых при подобных измерениях.

Работа также должна была показать, в какой мере можно доверять разным опубликованным исследованиям о мигании ламп, в которых особенно не изучается вопрос о точности измерительных установок.

## 1. Сущность явления

Рассматривая люминесцентную лампу при питании ее от сети переменного тока как источник света с переменным во времени световым потоком, необходимо помнить, что излучение лампы складывается из излучения ртутного разряда, меняющегося от нуля до максимума за время полупериода переменного тока, и из излучения люминофора. При этом последнее излучение по величине в 7—8 раз превосходит первое и имеет сравнительно меньшую степень периодического изменения.

Используя один из известных приемов, можно исследовать характер периодичности изменения каждого из названных излучений. Излучение ртутного разряда, имеющего зеленовато-голубую окраску, меняется синхронно с удвоенной частотой сети и притом весьма резко, тогда как излучение люминофора с красновато-желтой окраской меняется в меньшей степени; в то же время за счет явления послесвечения люминофора кривая этого изменения оказывается смещенной по отношению к кривой изменения первого излучения.

Характер изменения цвета излучения люминесцентной лампы хорошо наблюдается через отверстие в диске, насаженном на ось синхронного электродвигателя, включенного в ту же сеть, что и лампа. Здесь ясно заметно сильное прерывистое изменение зеленовато-голубого излучения, совершенно исчезающего в моменты прекращения разряда в лампе при переходе кривой электрического тока через нуль, когда становится отчетливо видна красно-желтая окраска излучения за счет люминофора.



Самая сильная голубая составляющая излучения лампы, определяющаяся ртутной линией 435,8  $\mu\mu$ , находящейся в видимой области спектра, в момент своего максимума составляет примерно

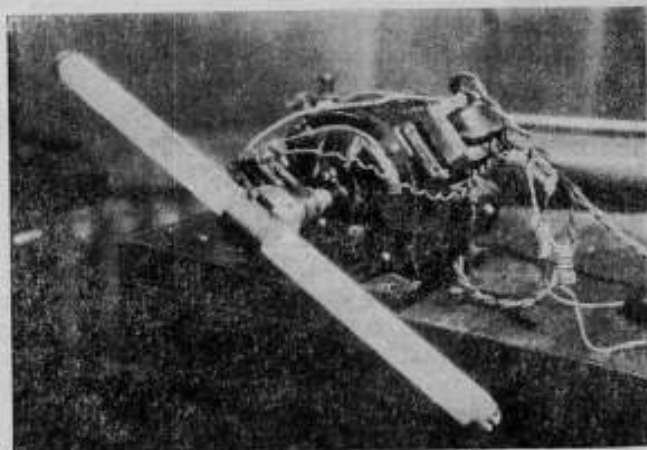


Рис. 1.

лишь 0,3% светового потока лампы, а потому ее влияние на явление мигания незначительно. Существеннее роль зеленых и желтых спектральных линий ртути, хотя, однако, световой поток всех этих спектральных линий составляет, как упоминалось выше, примерно  $\frac{1}{8}$  всего потока лампы. Происходящее изменение цвета излучения люминесцентной лампы особенно хорошо наблюдается иным путем. Люминесцентная лампа, включенная в сеть, приводится во вращение вокруг оси, перпендикулярной к ее продольной оси и проходящей лучше через ее середину, причем скорость этого вращения подбирается надлежащим образом (рис. 1).

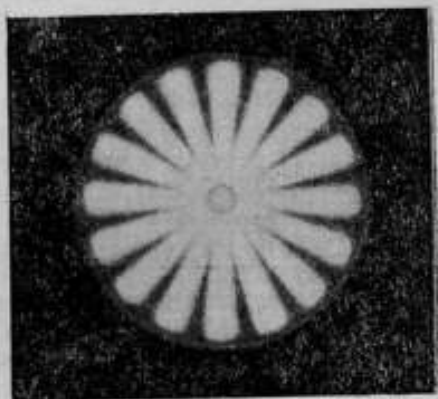


Рис. 2.

При угловой частоте вращения, кратной частоте питающего лампы переменного тока, получается светящийся диск с соответствующим числом радиальных темных и светлых полос (подобно спицам у колеса, рис. 2). Последовательный переход окраски излучения здесь отчетливо виден. Нетрудно понять, что на полученную таким образом цветную картину можно несколько влиять

путем изменения величины подводимого к лампе напряжения или частоты переменного тока.

Величину колебания светового потока любого электрического источника света переменного тока вообще принято характеризовать коэффициентом колебания, определяемым одним из ряда предложенных соотношений. В частности, более правильно этот коэффициент определять из соотношения

$$\varepsilon = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{ср}}}$$

или

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{ср}}}$$

Синусоидальная форма питающего люминесцентную лампу тока оказывается обычно искаженной за счет индуктивного характера добавочного сопротивления, применяемого при лампе. На форму кривой изменения светового потока лампы влияет также род люминофора, использованного в лампе.

## 2. Методика измерений

В основу методики измерений может быть положен один из приемов, позволяющих измерить интересующую нас световую величину при любой фазе ее периодического изменения. Приемы эти основаны обычно на субъективном или объективном способах измерений или регистрации переменной величины, причем для каждого случая имеется вполне определенное средство для осуществления.

Такими средствами могут быть, вообще говоря, или зеркало, вращающееся синхронно с частотой периодического изменения световой величины, или же диск с отверстием, насаженный на ось синхронного электродвигателя, питаемого от общей с лампой сети переменного тока.

При объективном способе вместо глаза используется надлежащий фоточувствительный приемник химического (фоточувствительный материал) или электрического (фотоэлемент) типа. Применимость теплового приемника несколько сомнительна.

Излишне в данном случае останавливаться на преимуществах и недостатках всех мыслимых приемов и средств, необходимо лишь указать, что лучшим по ряду причин следует считать способ синхронно вращающегося диска как для субъективного, так и для объективного способа измерений, почему этот прием и был использован в настоящей работе.

Для решения поставленной задачи измерения периодической световой величины совершенно безразлично, производятся ли измерения в абсолютных или в относительных величинах (возможно и то и другое), а потому все последующие измерения были лишь относительными.

Корпус (статор) электродвигателя для диска был скреплен с лимбом таким образом, что можно было поворачивать корпус вокруг оси, совпадающей с осью ротора.

На ось указанного электродвигателя насаживался диск диаметром 40 см с двумя расположенными по диаметру секторными прорезами, каждый с угловым размером в  $3,6^\circ$ . Коэффициент пропускания диска, следовательно, был 0,02 для неменяющегося света.

Наблюдая горящую люминесцентную лампу через такой вращающийся со скоростью 1500 об/мин диск (при частоте тока 50 Hz) и одновременно поворачивая корпус электродвигателя, можно обнаружить за время полного оборота корпуса (или, что то же, диска) четыре периода изменения световой величины.

Принятое при большинстве последующих измерений угловое перемещение по лимбу через  $2,5^\circ$  нетрудно выразить в значении времени, отвечающему промежутку, в течение которого изменяется измеряемая световая величина. Каждому периоду изменения наблюдаемой величины при описанном устройстве соответствует четверть оборота диска, т. е.  $90^\circ$ , в то же время известно, что фактически период изменения светового потока люминесцентной лампы (при частоте питания сети в 50 Hz) равен 0,01 сек. Поворотами статора электродвигателя последовательно через  $2,5^\circ$  наблюдаемый через диск период изменения световой величины делится на 36 частей, а потому измеряемой величине соответствует промежуток времени  $\frac{0,01}{36} \approx 0,29$  микросекунды.

Измерения производились универсальным трубочным фотометром, установленным на близком расстоянии (около 10 см) от люминесцентной лампы, прикрытой щитком с отверстием, одинаковым с секторным вырезом в диске, находящемся между лампой и фотометром.<sup>1</sup>

Общий вид установки показан на рис. 3.

Полное выравнивание цвета полей сравнения при резко меняющейся окраске излучения люминесцентных ламп получить сравнительно трудно, а потому чисто опытным путем были найдены наиболее благоприятные условия для измерения во всех фазах, благодаря подбору одного подходящего голубого стекла, помещаемого перед лампой сравнения в фотометре.

Люминесцентные лампы для измерений были взяты двух основных типов, а именно "белая" и "дневная", причем с каждой из них измерения производились многократно одним лицом, а в отдельных случаях — и двумя лицами. Последнее представлялось необходимым для выяснения вопроса возможных в таких случаях расхождений между наблюдателями и лучшего суждения о точности измерений.

Предварительный ряд измерений через  $2,5^\circ$  показал, что вполне достаточно вести измерения даже через  $5^\circ$ , ибо для построения кривой изменения световой величины, имеющей плавно изменяю-

<sup>1</sup> Дифрагмирование лампы позволяло иметь условия более четкого выделения измеряемого участка.

щийся вид, совершенно достаточно иметь на каждый период лишь 18 значений. При этом также обнаружилось, что у некоторых ламп имеется заметное различие между кривыми изменения световой величины для смежных периодов. Это обуславливается различием характера разряда в лампе при смежных полупериодах электрического тока в лампе, что в дальнейшем подтвердилось осциллографическим путем. Вследствие этого было бы неправильным в таких случаях сравнивать результаты измерений, полученные по двум смежным периодам. Нельзя, естественно, также считать отнесенными к одной фазе в периоде значения, измеренные при одном и том же угловом положении статора электродвигателя (одинаковый отсчет по лимбу), но при различных отно-

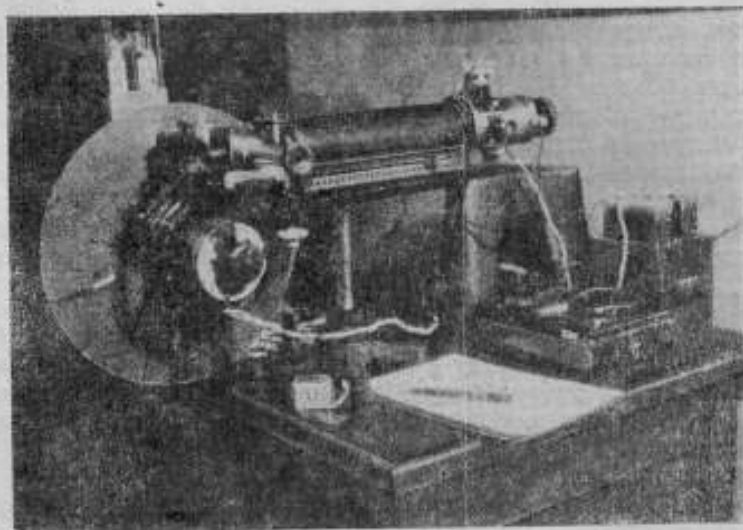


Рис. 3.

сительных положениях лампы, диска и фотометра. Положения максимума и минимума построенных при этом кривых изменения световой величины могут отвечать различным отсчетам по лимбу.

Результаты измерений, произведенных двумя наблюдателями для двух люминесцентных ламп, приведены в табл. 1. Сравнительно большие (до 5—6% от среднего) расхождения между наблюдателями в отдельных редких случаях (около „темных“ фаз) приходится отнести в первую очередь за счет большой разноцветности полей сравнения в фотометре. Эти расхождения (принципиально) могли бы быть значительно снижены при лучшем выравнивании цвета полей с помощью подобранных фильтров и при увеличении числа измерений.

На рис. 4 изображены кривые изменения относительной силы света для двух люминесцентных ламп, построенные по средним значениям, указанным в табл. 1. Кривые позволяют, в частности,

Таблица 1

| Отсчеты по<br>линому, градусы | „Белая“ лампа |          |         |                  | „Дневная“ лампа |          |         |                 |
|-------------------------------|---------------|----------|---------|------------------|-----------------|----------|---------|-----------------|
|                               | наблюдатели   |          | среднее | отклонение,<br>% | наблюдатели     |          | среднее | отклонение<br>% |
|                               | А. М. С.      | В. Е. К. |         |                  | А. М. С.        | В. Е. К. |         |                 |
| 60                            | 54,6          | 54,4     | 54,5    | ±0,2             | 58,4            | 58,2     | 58,3    | ±0,2            |
| 55                            | 49,6          | 49,0     | 49,3    | ±0,5             | 48,1            | 47,8     | 47,7    | ±0,8            |
| 50                            | 45,1          | 43,9     | 44,5    | ±1,4             | 37,8            | 39,1     | 38,5    | ±1,6            |
| 45                            | 55,5          | 51,8     | 53,6    | ±3,4             | 27,8            | 26,8     | 27,3    | ±0,7            |
| 40                            | 68,1          | 64,1     | 66,1    | ±3,0             | 41,4            | 36,4     | 38,8    | ±6,4            |
| 35                            | 77,7          | 75,5     | 76,6    | ±1,4             | 58,2            | 53,0     | 55,6    | ±4,7            |
| 30                            | 85,0          | 85,0     | 85,2    | ±0,2             | 68,5            | 67,5     | 68,0    | ±0,7            |
| 25                            | 91,2          | 92,0     | 91,9    | ±0,8             | 79,0            | 80,4     | 79,7    | ±0,9            |
| 20                            | 95,7          | 94,5     | 95,1    | ±0,6             | 86,0            | 85,0     | 85,8    | ±0,2            |
| 15                            | 97,8          | 99,2     | 98,5    | ±0,7             | 92,1            | 90,8     | 91,4    | ±0,6            |
| 10                            | 100,0         | 100,0    | 100,0   | ±0,0             | 96,2            | 97,1     | 96,6    | ±0,4            |
| 5                             | 98,0          | 98,5     | 98,2    | ±0,2             | 100,0           | 100,0    | 100,0   | ±0,0            |
| 0                             | 95,6          | 94,1     | 94,8    | ±0,8             | 100,0           | 98,7     | 99,4    | ±0,6            |
| 5                             | 90,7          | 91,0     | 91,0    | ±0,3             | 97,9            | 96,1     | 96,7    | ±0,6            |
| 10                            | 84,5          | 85,4     | 84,8    | ±0,6             | 93,0            | 90,0     | 92,2    | ±1,7            |
| 15                            | 77,1          | 76,0     | 76,8    | ±0,3             | 86,7            | 87,7     | 87,2    | ±0,6            |
| 20                            | 70,1          | 69,8     | 70,0    | ±0,3             | 77,4            | 75,0     | 76,2    | ±1,6            |
| 25                            | 62,9          | 62,2     | 62,6    | ±0,6             | 68,0            | 66,3     | 67,2    | ±1,3            |
| 30                            | 55,8          | 54,8     | 55,8    | ±0,9             | 58,0            | 57,2     | 57,6    | ±0,7            |
| 35                            | 50,8          | 48,7     | 49,8    | ±0,8             | 47,8            | 47,0     | 47,7    | ±0,2            |
| 40                            | 45,2          | 44,8     | 45,0    | ±0,4             | 38,2            | 36,4     | 37,3    | ±2,4            |
| 45                            | 55,2          | 55,4     | 55,3    | ±0,2             | 28,0            | 25,8     | 26,6    | ±5,1            |
| 50                            | 68,0          | 67,0     | 67,5    | ±0,7             | 41,7            | 40,5     | 41,1    | ±1,5            |

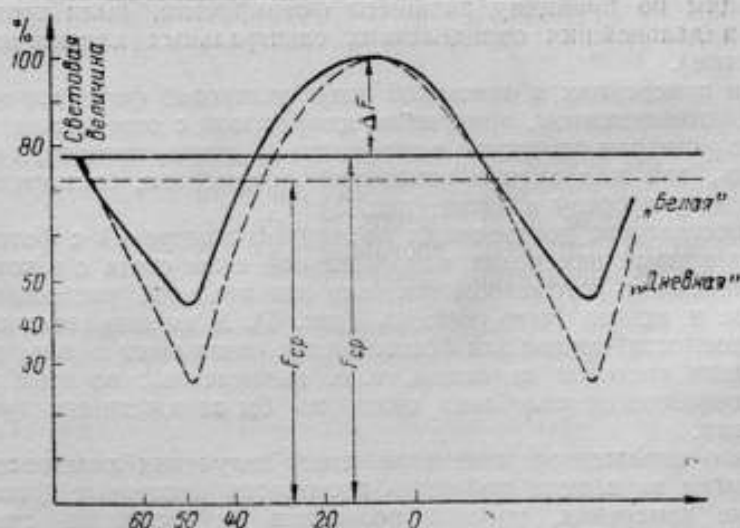


Рис. 4. Изменение световой величины у люминесцентных ламп за период.

судить о несколько большем колебании силы света у „дневной“ лампы, нежели у „белой“, тогда как по форме эти кривые, вообще, близки между собой.

Различие между лампами в отношении степени колебания у них световой величины может быть выражено через коэффициенты колебания, определение которых не представляет трудностей. Для этого следует найти среднее значение световой величины за период ее изменения и взять отношение к ней разности между максимальным значением и этой средней величиной. Значения этих коэффициентов, поясненных рис. 4, оказались равными 0,29 для „белой“ и 0,39 для „дневной“ лампы.

Для объективных измерений, которые рассматривались только для сопоставления, были использованы селеновые фотоэлементы двух различных типов. В качестве измерительного прибора применялся микроамперметр со светящимся отсчетом.

Селеновые фотоэлементы, а не другие (с внешним фотоэлементом), выбор которых был бы более правильным, были взяты, во-первых, по причине удобства и простоты, а во-вторых, для установления степени пригодности их при работе с люминесцентными лампами, имея в виду наибольшую распространенность селеновых фотоэлементов. К недостаткам селеновых фотоэлементов относится заметная инерционность их, что в некоторой мере должно влиять на результаты измерений в условиях освещения их прерывистым световым потоком. Так как, кроме того, световой поток люминесцентной лампы изменяется значительно и по спектральному составу, то это также не может не сказываться на показаниях фотоэлемента. Электроизмерительный прибор при пульсирующем токе может показывать несколько иначе, чем при постоянном неизменном. Исследования с фотоэлементом, действующим по принципу внешнего фотоэффекта, были произведены в дальнейших определениях спектральных характеристик (см. ниже).

При измерениях в описанной выше установке фотометр заменялся фотоэлементом, прикрытым диафрагмой с отверстием, равным по размерам отверстию в диафрагме на лампе, которое, в свою очередь, как и в случае измерений фотометром, соответствует секторному прорезу в диске (рис. 5).

Сопоставление построенных по данным измерений с фотоэлементом кривых изменения относительной силы света с таковыми по измерениям фотометром показало значительное расхождение, которое и можно было ожидать (рис. 6). А именно (вследствие инерционности) кривая для фотоэлемента показывает менее резкие колебания световой величины, т. е. вычисленные по этим кривым коэффициенты колебания оказались бы заниженными против истинных.

Резко выраженное изменение цвета излучения люминесцентной лампы за период побудило произвести некоторые дополнительные измерения, которые позволили бы расширить опыт и несколько пополнить знания в этом вопросе. Представлялось желательным определить относительные кривые спектрального

распределения мощности люминесцентной лампы для различных фаз изменения светового потока лампы. Для этого пришлось вновь воспользоваться описанным выше синхронно вращающимся

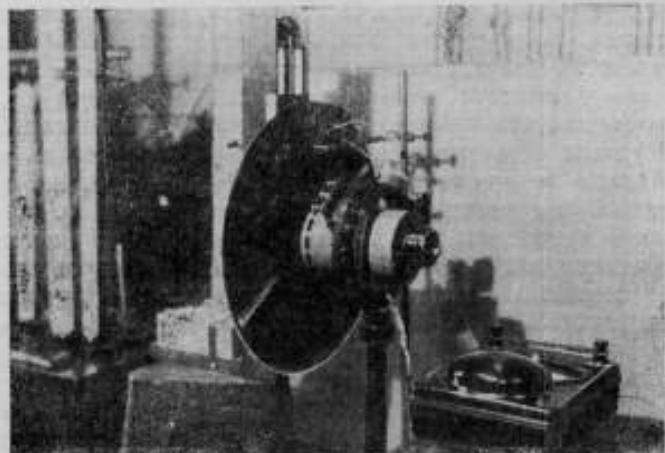


Рис. 5.

диском, помещенным между лампой и входной щелью монохроматора. Люминесцентную лампу с относительно малой яркостью,



Рис. 6. Изменение световой величины у «белой» люминесцентной лампы за период по измерениям различными способами.

которая значительно уменьшается в данном случае за счет диска, пришлось предельно приблизить к входной щели, которая вместе с тем, как и все остальные щели взятого двойного монохроматора, была большего размера (1,0 м.м).

Измерения были произведены при лампах опять-таки двух основных типов, причем одновременно измерялись также и отно-

сительные мощности излучения ртутных спектральных линий видимой области спектра.

Результаты всех этих измерений, выраженные надлежащим образом графически, приведены на рис. 7 и 8 и дают основание сделать некоторые заключения. В частности, простое сопоставление серий кривых, полученных для „белой“ и „дневной“ ламп, поясняет сущность значительной разницы между этими типами ламп в отношении характера изменения цвета излучения за период. Можно полагать, что изменение цвета при этом обусловливается в большей мере относительным колебанием излучения коротковолновой части видимого участка спектра, а это колебание оказывается наиболее значительным у „дневной“ лампы.

На рис. 9 приведены для полноты суждения результаты измерений мощности излучения четырех ртутных спектральных линий у „белой“ лампы. Ход кривых, отвечающих фазам, примыкающим к „темным“ фазам, т. е. когда разряда в лампе нет, свидетельствует о резком изменении в момент возникновения разряда. Точное определение углового размера „темной“ зоны в периоде потребовало бы некоторого усложнения методики, а потому, как выходящее за пределы настоящей работы, не было произведено. Приблизительные же измерения показывают, что спектральные линии не обнаруживаются в пределах  $5-8^\circ$  периода, охватывающего в нашем случае  $90^\circ$ .

Полученные величины относительной мощности излучения в пределах видимой области спектра позволили рассчитать по этим данным координаты цвета. Этот расчет, естественно, произведен с учетом четырех видимых спектральных линий ртути.

В табл. 2 даны полученные координаты цвета для предельных случаев.

Таблица 2

| Лампа         | Координаты цвета |       |         |       |
|---------------|------------------|-------|---------|-------|
|               | максимум         |       | минимум |       |
|               | X                | Y     | X       | Y     |
| „Белая“ . . . | 0,359            | 0,340 | 0,536   | 0,451 |
| „Дневная“ . . | 0,292            | 0,301 | 0,543   | 0,453 |

Отвечающие указанным координатам точки в цветовом треугольнике (подтверждая сделанное ранее заключение) показывают, что при максимуме излучения цвета обеих ламп лежат в пределах, близких к кривой черного тела, а при минимуме они располагаются далеко от нее и притом на самом краю цветового треугольника (рис. 10).

Отдельно поставленные исследования показали, что пульсирующий ток фотоэлемента не искажает результатов измерений благо-



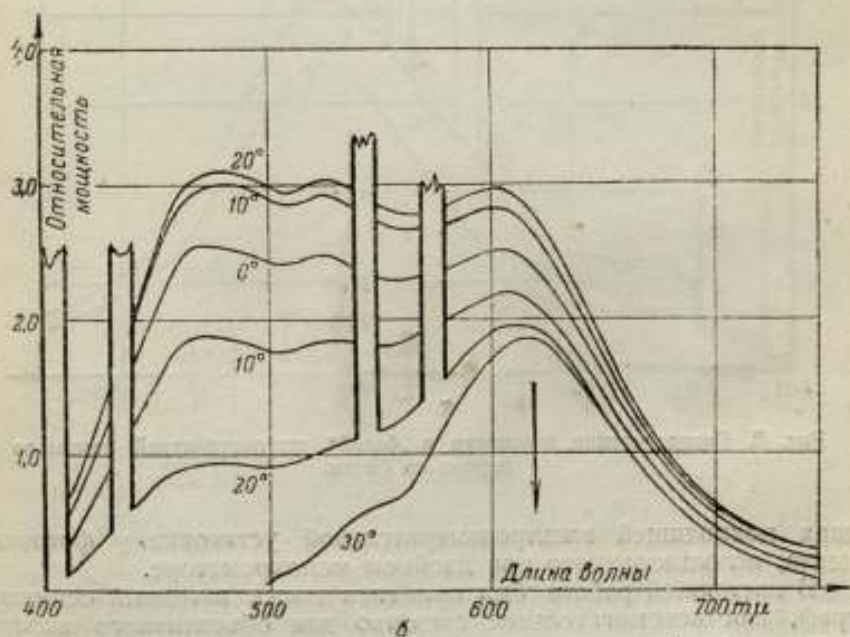
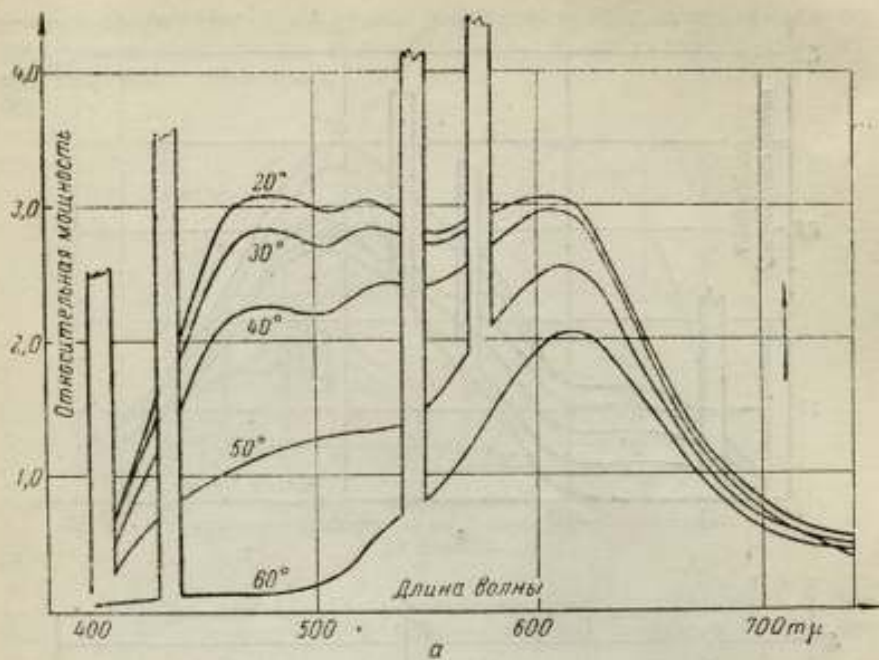


Рис. 7: Распределение мощности у «дневной» люминесцентной лампы за период по фазам.

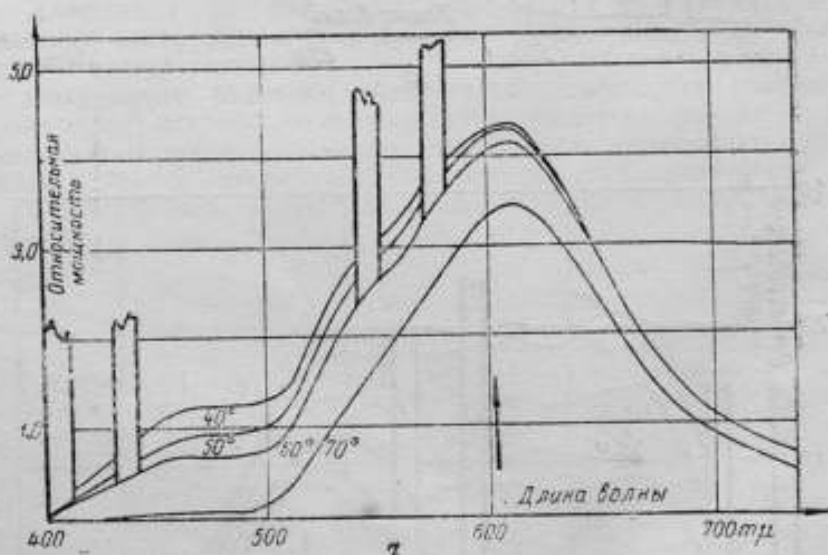
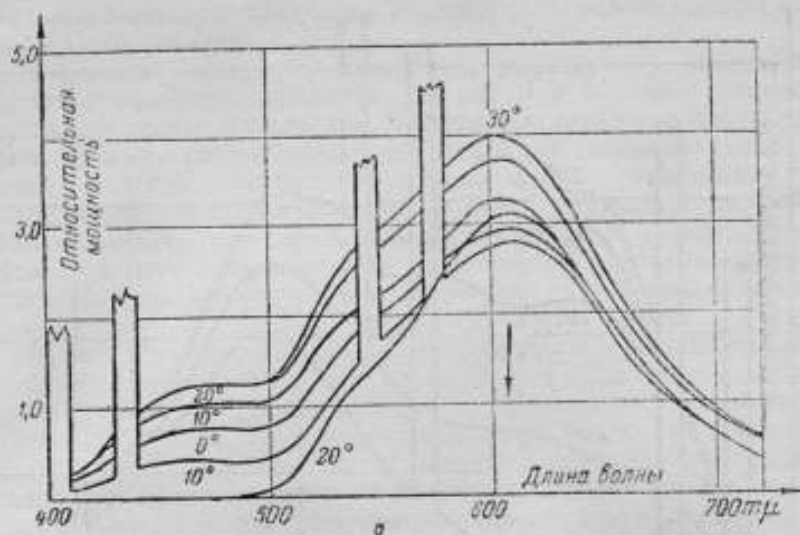


Рис. 8. Распределение мощности у «белой» люминесцентной лампы за период по фазам.

даря подходящей электронизмерительной установке у фотоэлемента, использованного при двойном монохроматоре.

В настоящей работе был применен также катодный осциллограф, как вспомогательное средство для объективного наблюдения характера периодически изменяющегося процесса. На отклоняющие пластины осциллографа подавался через надлежащее

сопротивление ток от вакуумного фотоэлемента, освещаемого исследуемым источником света (или же другая интересующая нас электрическая величина).

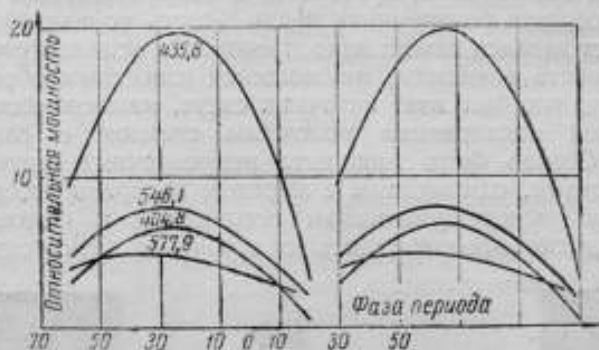


Рис. 9. Изменение мощности излучения ртутных спектральных линий у «белой» люминесцентной лампы за период.

Так как чувствительность осциллографа и фотоэлемента в данном случае оказались недостаточными, то пришлось применить

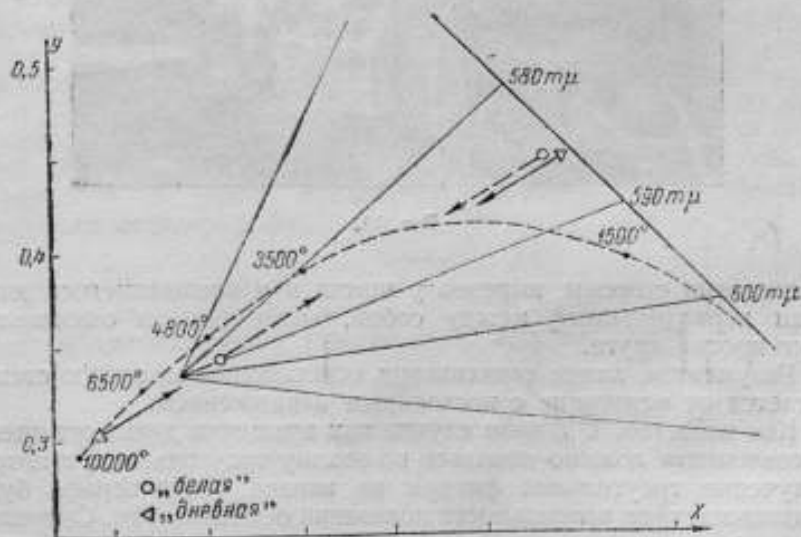


Рис. 10. Предельные изменения цвета люминесцентных ламп за период.

фотоусилитель, собранный по схеме на сопротивлении и имеющий лишь одну лампу. Усилитель, осциллограф и связывающие их провода, как и источники питания усилителя, были хорошо экранированы и заземлены. Общий вид установки поясняет рис. 11.

Прямолинейность (пропорциональность) в работе такого фотоусилителя совместно с осциллографом (имеющим также усиленную схему) в тех режимах, которые поддерживались при измерениях, естественно, нуждалась в подтверждении. Направлялся вопрос, как подтвердить правильность показаний осциллографа. Ответ давался такой: надо произвести осциллографом определение свойств величины, меняющейся известным образом.

С этой целью был взят источник света, являющийся освещаемым лампой накаливания молочным стеклом с равномерной яркостью. Стекло было прикрыто непрозрачным щитком с секторным вырезом, одинаковым с вырезом во вращающемся диске, помещенном между указанным источником и фотоэлементом. Вращение диска производилось синхронным электродвигателем.

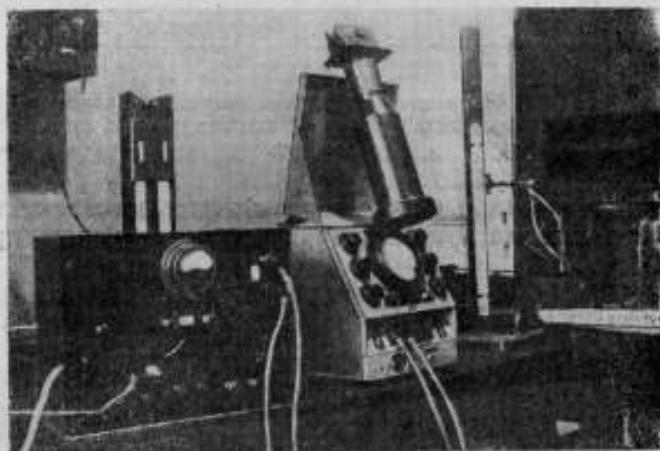


Рис. 11.

Радиальные стороны вырезов у щитка и у вращающегося диска были параллельными между собой, когда вырезы оказывались друг против друга.

Разумеется, лампа накаливания, освещающая молочное стекло, питается от источника с постоянным напряжением.

Как известно, в данном случае при вращении диска освещение фотоэлемента должно меняться по закону треугольника, а потому получение треугольной фигуры на экране осциллографа будет подтверждением правильности показаний осциллографа. Очертания вырезов, строго подходя, можно менять с тем, чтобы приблизить осциллограмму по форме к кривой, которую дает люминесцентная лампа.

Проведенное исследование дало очень хорошее воспроизведение треугольного характера изменения световой величины на экране осциллографа.

Исследования показали, что катодный осциллограф принципиально можно считать вполне пригодным для регистрации пе-

риодически изменяющихся световых величин, при соблюдении, однако, ряда условий. Использование катодного осциллографа, в частности, для исследования аperiodических световых процессов, естественно, возможно, если дополнить схему осциллографа надлежащим задерживающим электронным луч устройством и устройством для синхронизации момента освобождения луча с началом исследуемого аperiodического светового процесса.

### Выводы

1. Измерение периодически меняющейся световой величины у люминесцентной лампы с помощью синхронно вращающегося диска с прорезом и фотометра может обеспечить достаточную для практики и даже довольно высокую точность измерений при условии большого числа измерений и притом несколькими наблюдателями. Такой способ измерений признается пригодным для проверки других способов.

2. Селеновый фотозлемент, даже с выравнивающим фильтром, не может дать удовлетворительных результатов измерений быстро изменяющейся световой величины по причинам своей инерционности и другим.

3. Фотозлементы с внешним фотоэффектом пригодны для рассматриваемых световых измерений.

4. Резкое изменение цвета люминесцентной лампы за период создает значительные снижающие точность измерений трудности. Влияние этого можно уменьшить, применяя надлежащий набор фильтров для выравнивания цвета полей сравнения в фотометре.

5. Катодный осциллограф совместно с фотоусилителем представляет собой достаточно удобный прибор для наблюдения периодически изменяющейся световой величины, однако точность его ограничена. В работе предлагается способ проверки показаний катодного осциллографа.

---

Работа выполнена при частичном руководстве проф. П. М. Тиходеева и при некотором участии В. Е. Каргашевской.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ЦВЕТОВЫХ ВОСПРИЯТИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ АДАПТАЦИИ ГЛАЗА

### 1. Прибор для колориметрического исследования явления цветовой адаптации глаза

Как известно, колориметрия основывается на спектральных свойствах глаза нормального наблюдателя, и измерительным прибором в колориметрии в конечном счете является глаз. При этом часто глаз выступает в качестве нулевого прибора, и наблюдатель должен констатировать лишь равенство или неравенство излучений (обычного типа колориметрические установки), или же глазу предлагается более сложная задача оценки степени различия или сходства между излучениями. В этом последнем случае мы имеем дело с цветовыми порогами глаза.

Цветовой порог, понимаемый как наименьшее воспринимаемое глазом различие между цветами, можно считать присущей самому глазу некоторой мерой степени различия или сходства между цветами. Конечно, эта мера в значительной степени остается неопределенной, поскольку способность глаза к восприятию цветовых различий зависит как от наблюдаемых цветов, так и от состояния адаптации глаза во время наблюдения.

Измерение цветовых порогов в строго определенных условиях опыта может иметь некоторое научное и практическое значение, но этими задачами не может удовлетвориться научная колориметрия.

Возможно надеяться, что изучение законов адаптационного процесса позволит определять путем расчета цветные пороги глаза в различных условиях опыта.

На стержневой характер проблемы адаптации для колориметрии впервые указал Н. Д. Ньюберг [1]. Еще в 1929—1930 гг. на основе простых опытов и анализа общеустановленных фактов им были получены общие закономерности процесса адаптации и намечен путь колориметрического исследования этого явления.

В 1945 г. автором были произведены некоторые опыты по исследованию адаптации. Исследование производилось на специальном сконструированном нами приборе, идея создания которого была предложена Н. Д. Ньюбергом в 1933 г.

Остановимся сначала на том общем физическом понимании явления адаптации, которое связано с трехцветной гипотезой Юнга-Гельмгольца, и кратко изложим некоторые соображения Н. Д. Ньюберга, положенные в основу наших исследований.

Гипотеза Юнга-Гельмгольца дает простую схему цветовых восприятий. Глаз подобно физическому приемнику реагирует на внешнее излучение. В силу трехмерности многообразия цветовых восприятий предполагается, что излучение воспринимается тремя приемниками с качественно различными кривыми чувствительности по спектру. Реакции приемников можно записать в виде трех интегралов

$$\left. \begin{aligned} R &= \int E(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\ G &= \int E(\lambda) g(\lambda) d\lambda \\ B &= \int E(\lambda) b(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $E(\lambda)$ —функция, выражающая распределение энергии источника по спектру,  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ —функции, выражающие абсолютные чувствительности приемников; интегрирование распространено на всю видимую часть спектра.

Совокупный результат этих трех реакций  $R$ ,  $G$ ,  $B$  определяет цветовые ощущения. В то же время глаз отличается от физического приемника прежде всего тем, что во время наблюдения его зрительные свойства, характеризуемые функциями  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ , непрерывно изменяются. Это изменение и есть процесс адаптации глаза. Согласно гипотезе Юнга-Гельмгольца, каждая из функций  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  и  $b(\lambda)$  изменяется подобно самой себе независимо от двух других. Таким образом, можно написать следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} r(\lambda) &= k_1(t) r_0(\lambda) \\ g(\lambda) &= k_2(t) g_0(\lambda) \\ b(\lambda) &= k_3(t) b_0(\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $r_0(\lambda)$ ,  $g_0(\lambda)$ ,  $b_0(\lambda)$ —спектральные чувствительности приемников при некотором состоянии адаптации, условно принятом за нулевое. Тогда состояние адаптации для всякого другого момента времени  $t$  можно характеризовать совокупностью трех независимых от  $\lambda$  коэффициентов чувствительности приемников  $k_1(t)$ ,  $k_2(t)$ ,  $k_3(t)$ .

Такое толкование подтверждается тем опытным фактом, что излучения, воспринимаемые глазом, как одинаковые по цвету, остаются одинаковыми при любом состоянии адаптации, однородном по всей сетчатке глаза, или, другими словами, измененное общее состояние адаптации глаза не нарушает колориметрических равенств. (Здесь мы отвлекаемся от тех малых нарушений колориметрических равенств, которые наблюдались Райтом [2], а также втором [3] в результате предварительной адаптации глаза к чрезвычайно ярким или сильно насыщенным цветам.)

С другой стороны, наличие разницы в состояниях адаптации участков сетчатки приводит к нарушению колориметрических

равенств. Одинаковые по цвету и даже одинакового спектрального состава излучения воспринимаются как различные, а различные могут восприниматься как одинаковые. Обычное колориметрирование в таких условиях становится невозможным.

Соображения Н. Д. Ньюберга, относящиеся к состоянию адаптации,<sup>1</sup> заключаются в следующем. Цветовое ощущение определяется стимулом и состоянием адаптации глаза. Под стимулом в колориметрии понимают группы одинаково выглядящих излучений, которые определяются из установок на равенство.

$$\begin{aligned} \int E_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int E_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ \int E_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int E_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ \int E_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int E_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned}$$

где  $E_1(\lambda)$  и  $E_2(\lambda)$  — функции, характеризующие спектральное распределение источников, а  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  и  $\bar{z}(\lambda)$  — функции, характеризующие спектральные свойства глаза. Слово стимул в колориметрии часто отождествляется со словом цвет. При некотором состоянии адаптации каждый стимул будет вызывать определенное цветовое ощущение. При другом состоянии адаптации те же стимулы вызовут другие цветовые ощущения. Из повседневного опыта мы знаем, что область цветовых ощущений не изменяется значительно. Следовательно, с каждым стимулом, вызывающим определенное цветовое ощущение при заданном состоянии адаптации, можно сопоставить другой стимул, дающий такое же цветовое ощущение при другом состоянии адаптации, и изменение состояния адаптации можно рассматривать как преобразование пространства стимулов. Некоторые опытные данные указывают на то, что эти преобразования являются, повидимому, линейнооднородными, т. е.

$$\begin{aligned} \xi &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z, \\ \eta &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z, \\ \zeta &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z, \end{aligned}$$

где  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$  и  $x$ ,  $y$ ,  $z$  можно рассматривать, как координаты стимулов до и после преобразования. (В действительности, конечно, преобразуется пространство восприятий, а не пространство стимулов.) Адаптационный сдвиг или различие адаптаций определяется матрицей этого линейного преобразования. Если эти преобразования имеют инвариантные оси, то, приняв их за основные оси колориметрической системы, мы можем всякое изменение адаптации толковать как изменение масштаба по этим осям. Отыскание самих инвариантных осей на основании опытным путем определенной матрицы преобразования сводится, как известно, к решению векового уравнения, т. е. является чисто вычислительной задачей. Только в этой системе адаптацию можно пони-

<sup>1</sup> Большая часть работы Н. Д. Ньюберга [1] посвящена исследованию процесса адаптации.



мать как изменение чувствительности в том смысле, в каком это понимается в применении к измерительному прибору, и характеризовать тройкой чисел  $k_1, k_2, k_n$ . Инвариантные оси, очевидно, будут соответствовать физиологической системе измерения цвета, связанной с функциями трех приемников Юнга-Гельмгольца. Из рассмотренного следует также, что опытные данные позволяют нам определять лишь различия адаптаций, а не само состояние адаптации. При этом различие адаптаций можно воспроизводить и характеризовать парой стимулов, дающих зрительное равенство.

В 1934 г. Райт [4] опубликовал большую статью с результатами своих исследований адаптации. Постановка этих исследований, их направление и применяемая методика носят, подобно работе Н. Д. Ньюберга, отчетливо выраженный колориметрический характер и этим самым отличаются от большинства других исследований адаптации, представляющих интерес главным образом для физиологии. Райт пользовался методом уравнивания ощущений, вызываемых различными стимулами на разноадаптированных участках сетчатки глаза.

Такая же идея независимо от него была положена в основу конструкции описываемого здесь прибора. Она предусматривает возможность получения наряду с полями сравнения полей адаптации и замену одних другими.

В установке Райта создание полей адаптации достигалось с помощью дополнительного приспособления к спектральному колориметру его конструкция [4]. Замена полей адаптации полями колориметра совершалась путем переноса глаза наблюдателя. Все наблюдения приводились к состоянию темновой адаптации, как к нулевому.

Мы хотели бы здесь указать на три существенных недостатка в методике Райта: 1) наличие неконтролируемых возмущений в состоянии адаптации при переносе глаза, 2) пользование понятием чувствительности в системе цветов прибора, 3) неопределенность состояния темновой адаптации, принимаемого за исходное.

Последнее заключение в отличие от первых двух может показаться спорным. В ряде колориметрических работ принимается, что после темновой адаптации, длящейся в течение долгого времени, глаз участвует в измерениях, находясь в определенном начальном состоянии. В действительности выбор темновой адаптации в качестве исходной—неудачен. Это состояние адаптации, как и всякое другое, легко нарушается каждым актом измерения, но кроме этого в отличие от других—труднее всего восстанавливаемо.

В конструкции прибора, предназначенного для исследования различных свойств и сторон адаптационных явлений, предусматривались следующие возможности:

- 1) создание полей адаптации различной цветности в широком диапазоне яркости;
- 2) одновременное наблюдение трех различных пар полей сравнения и измерение их цвета;

3) быстрая смена полей адаптации полями сравнения, и наоборот;

4) создание переменного цветного фона, окружающего поля сравнения.

Оптическая схема прибора изображена на рис. 1. Рис. 2 и 3 представляют вид прибора со стороны наблюдателя и сбоку.

Колориметрические поля прибора (рис. 1, а) состоят из трех примыкающих друг к другу пар. Цвет каждого поля может изменяться и быть измеренным. Поля адаптации имеют вид, показанный на рис. 1, б. В центре обоих полей находится фиксационная точка, не смещающаяся при их замене.

Три пары колориметрических полей предусмотрены, во-первых, для возможности измерения цветовых преобразований, вызванных одним и тем же различием состояния адаптации и проверки их линейности, во-вторых, для сравнительных измерений порогов в условиях различия состояния адаптации.

Темновая адаптация во всех опытах устранена. Наблюдения ведутся одним глазом при угловых размерах поля зрения  $6^\circ$  и угловых размерах окружающего фона около  $70^\circ$ .

На рис. 1 схема устройства прибора показана в горизонтальном и вертикальном разрезах. Прибор симметричен относительно осей  $AB$  и  $CD$  и состоит из трех частей: осветителя, собственно прибора (корпуса с оптической системой) и специального окуляра с осветительным устройством. (На рис. 2 и 3 окуляр изображен без осветительного устройства.)

Мощный осветитель  $S$  представляет собой сосуд, в котором помещены четыре кинопроекторных лампы 500 W, 110 V. Стенки сосуда сделаны полыми для охлаждения проточной водой. Внутренняя поверхность сосуда побелена сернистым барием. Осветитель имеет шесть прямоугольных окошечек, расположенных симметрично с двух сторон, по три одно под другим. Эти окошечки представляют собой диффузные источники света. Они обозначены на рис. 1 буквами  $a, b, c$ . Свет от них падает на шесть одинаковых линз  $L_5$ , так же симметрично расположенных, по три с каждой стороны, одна под другой, против каждого окошка осветителя (средние линзы по конструктивным соображениям несколько смещены). Перед каждой линзой стоит квадратная диафрагма  $O$  и рамка сложного светофильтра  $f$ . Она отдельно изображена в правом верхнем углу рис. 1 и состоит из трех прямоугольных цветных стекол: красного, синего и зеленого ( $K, З, С$ ). Стороны каждого квадратного светофильтра расположены параллельно сторонам квадратной диафрагмы  $O$  и его перемещения осуществляются в направлении сторон. Квадратные диафрагмы  $O$  помещены перед линзами  $L_5$  для упрощения градуировки шкал сложных светофильтров. Положение рамок фиксируется по связанным с ними миллиметровым шкалам. Благодаря наличию сложного светофильтра на белых экранах  $Э$ , заокрашенных окисью магния, мы имеем окрашенные изображения участков задней стенки осветителя. Их цвет изменяется в зависимости от соотношения площадей цветных стекол перед диа-

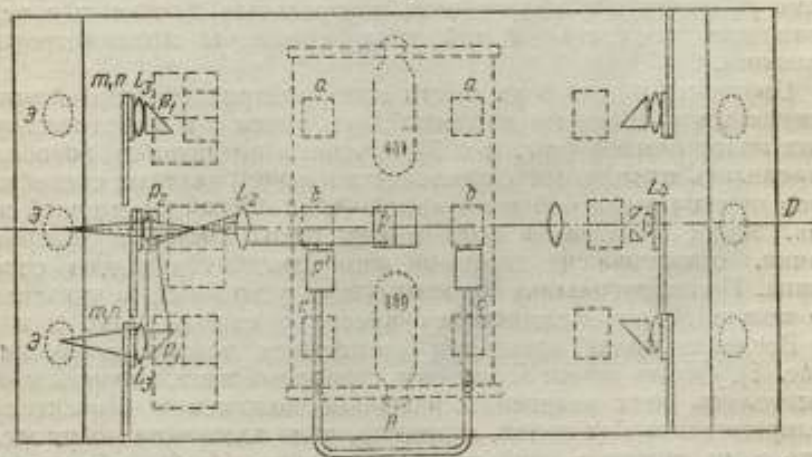
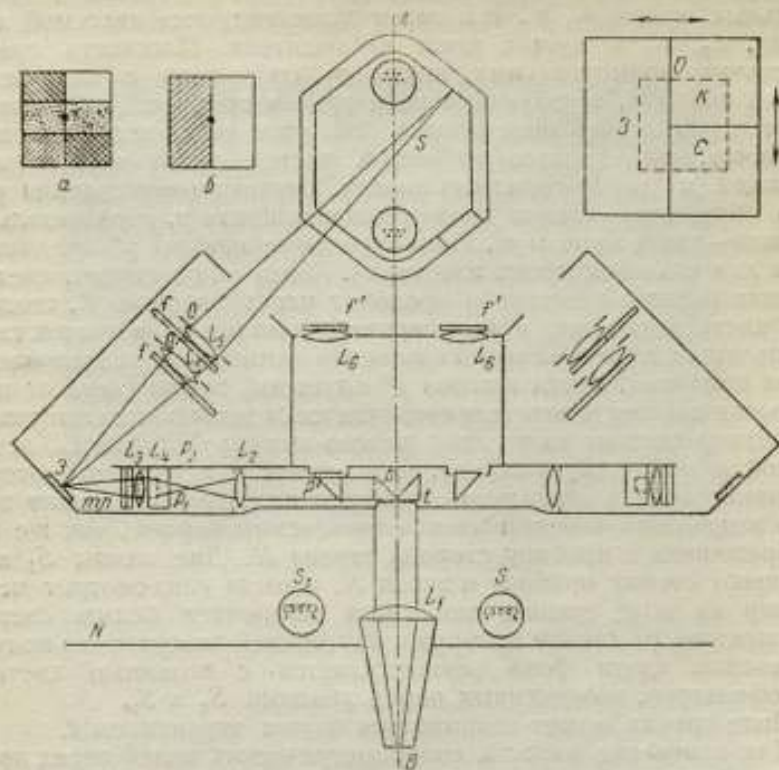


Рис. 1. Схема прибора.

фрагментами  $O$ . Три цветных пятна на экранах  $\mathcal{E}$  с каждой стороны прибора сводятся в оптическое соприкосновение системой прямоугольных призм  $p_1, p_2, p$  и затем проектируются системой линз  $L_3, L_4, L_2, L_1$  в зрачок глаза наблюдателя. Плоскость грани маленьких прямоугольных призм  $p_2$  сопряжена с плоскостью гравей призм  $p$ , образующих поле зрения прибора. Наблюдатель видит через окуляр поле зрения, как уже упоминалось, в виде окошечка, разделенного на шесть частей одной вертикальной границей и двумя горизонтальными. Вертикальная граница раздела образована краями прямоугольных призм  $p$ , горизонтальная граница — краями призм  $p_2$ . Прямоугольные призмы  $p'$  предназначены для создания полей адаптации. Когда они подняты, свет от средних окошек осветителя проходит через фильтры  $f'$ , создающие цвета адаптации, и фокусируется линзами  $L_6$  в зрачок глаза наблюдателя, а система полей сравнения автоматически заслоняется этими призмами. Когда призмы  $p'$  опущены, пучки света от центральных окошек осветителя автоматически задвигаются шторками.

Окуляр состоит из простой плоско-выпуклой линзы  $L_1$ , вставленной в коническую оправу, внутренняя поверхность которой алюминирована и зеркально отполирована. Передняя стенка прибора выкрашена в белый цвет сернистым барием, так же как и обращенная к прибору сторона экрана  $N$ . Две лампы  $S_1$  и  $S_2$  освещают стенку прибора и экран  $N$ , и когда глаз смотрит через окуляр на поле зрения, дно глаза заливается белым светом, отраженным от стенки прибора и внутренней поверхности конуса. Изменение цвета фона осуществляется с помощью цветных светофильтров, помещенных перед лампами  $S_1$  и  $S_2$ .

Поле зрения может закрываться белым экранчиком  $t$ .

Для изменения яркости колориметрических полей перед призмами  $p_2$  помещены желатиновые нейтральные клинья  $m$  с неподвижными подклиньями  $n$ . Клинья снабжены миллиметровыми шкалами.

Цветность каждого из шести колориметрических полей может изменяться с помощью поворота двух ручек  $\alpha$  и  $\beta$  соответствующих колориметров (рис. 2 и 3). Отсчеты по шкалам позволяют определить процентное отношение площадей цветных светофильтров перед квадратной диафрагмой  $O$ , т. е. цветности полей зрения. Яркость каждого поля может быть изменена поворотом ручки, связанной с перемещением соответствующего серого клина. Положение клина регистрируется неподвижным указателем по шкале  $d$ , перемещающейся вместе с клином (рис. 2 и 3).

Введение полей адаптации достигается поднятием ручки  $R$  (рис. 1). Около ручки  $R$  имеется стопорный винт, который может закреплять поля адаптации в любом положении относительно колориметрических полей, например, поля адаптации могут заслонить одну нижнюю пару полей сравнения. Чтобы убрать поля адаптации, надо только опустить ручку  $R$  или отжать стопорный винт.

В изучении процесса адаптации существенным моментом является установление подобия адаптационных процессов на

различных уровнях яркости в широком диапазоне. Верхний предел освещенности в солнечный день в наших широтах достигает значения 100 000 лк. Создание таких больших освещенностей

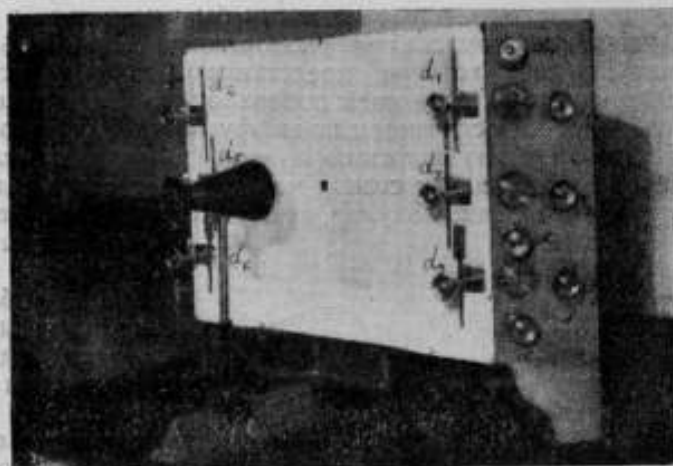


Рис. 3. Вид прибора сбоку.

в лабораторных условиях является очень трудной задачей, тем более, что в колориметрических приборах для получения равно-

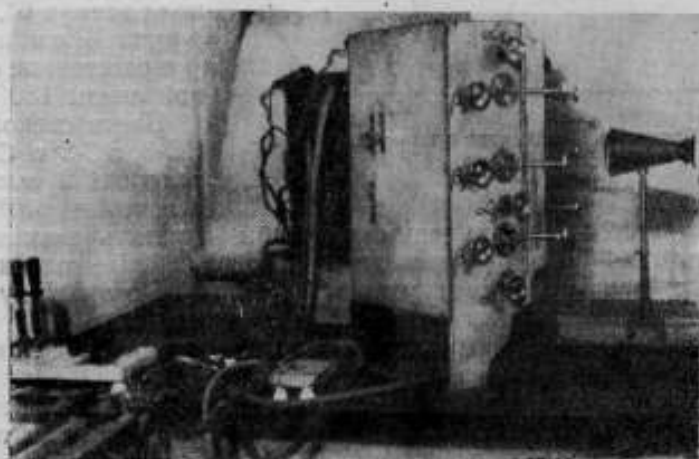


Рис. 2. Вид прибора спереди.

мерных по цвету полей приходится пользоваться диффузными излучателями.

Четыре кинопроекционные лампы 500 W, 110 V, заключенные в сосуд с внутренней поверхностью 2500 см<sup>2</sup>, могут обеспечить яркость осветителя порядка 30—45 св. Если яркость осветителя

упадет приблизительно до 10 *сб*, при пропускании цветных фильтров 5% и пропускании прибора 50%, то освещенность белых экранов составит около 10 000 *лк*.

Изучение явления адаптации предполагалось проводить на светлом фоне, яркость которого могла бы изменяться в соответствии с изменением яркости полей колориметров. Этим объясняется особая конструкция окуляра, представляющая собой усеченный конус с зеркально отражающей поверхностью. Если такой конус направить большим основанием на диффузно-рассеивающий экран, а к малому основанию вплотную приставить глаз, то вследствие зеркального отражения от стенок конуса дно глаза наблюдателя заливается светом. Такой окуляр, предложенный Г. Н. Раутманом

[5], обладает рядом преимуществ. Он позволяет приблизиться к естественным условиям наблюдения и устранить при колориметрических измерениях участие сумеречного зрения, не ограничивая размеры колориметрических полей.

В основу расчета оптической системы положены угловой размер поля зрения 6°, размер зрачка 4 *мм* и фокусное расстояние окулярной линзы 150 *мм*.

Цвета стекла марок КС-3, ЗС-2 и СС-5 при толщине 2 *мм* и при источнике 2840°К являются

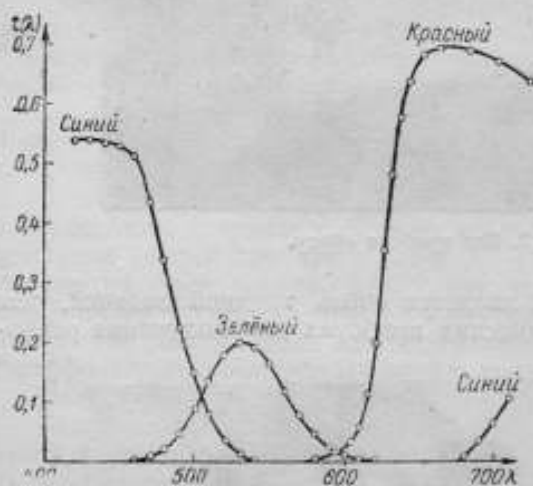


Рис. 4. Кривые коэффициентов пропускания световых фильтров прибора.

достаточно насыщенными, чтобы охватить значительную область цветового пространства. Отполированные плоскопараллельные цветные стекла укладывались в рамку между двумя зеркальными бесцветными стеклами.

На рис. 4 приведены кривые коэффициентов пропускания трех световых фильтров одной из рамок прибора.

Вычисленные значения цветовых координат (абсолютных и относительных) всех шести рамок прибора приводятся в табл. 1. Мы видим, что соответствующие цвета всех шести колориметров различаются между собой только по яркости. Чтобы привести их к единой системе прибора, цвета одной рамки (в нашем случае рамки № 4) при нулевом положении ее серого клина принимались за единичные цвета системы прибора.

Возможность неравномерного загрязнения стенок осветителя, белых экранов и оптических деталей учитывалась при определении яркостных множителей перед началом и в конце работы на

Цветовые характеристики фильтров колориметров

| Координаты | Р а м к и      |       |       |       |       |       |
|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | № 1            | № 2   | № 3   | № 4   | № 5   | № 6   |
|            | Красные стекла |       |       |       |       |       |
| X          | 18,96          | 26,67 | 20,99 | 18,82 | 21,53 | 20,25 |
| Y          | 7,68           | 11,24 | 8,67  | 7,74  | 8,87  | 8,64  |
| Z          | 0,001          | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,005 |
| x          | 0,712          | 0,704 | 0,708 | 0,709 | 0,708 | 0,701 |
| y          | 0,288          | 0,296 | 0,292 | 0,291 | 0,292 | 0,299 |
|            | Зеленые стекла |       |       |       |       |       |
| X          | 3,56           | 3,74  | 3,54  | 3,43  | 3,51  | 3,63  |
| Y          | 8,07           | 8,44  | 8,13  | 7,96  | 8,07  | 8,26  |
| Z          | 0,70           | 0,76  | 0,73  | 0,71  | 0,70  | 0,72  |
| x          | 0,289          | 0,289 | 0,286 | 0,284 | 0,286 | 0,288 |
| y          | 0,655          | 0,652 | 0,665 | 0,657 | 0,657 | 0,655 |
|            | Синие стекла   |       |       |       |       |       |
| X          | 2,85           | 2,74  | 2,71  | 2,82  | 2,77  | 2,84  |
| Y          | 1,78           | 1,61  | 1,53  | 1,65  | 1,69  | 1,77  |
| Z          | 15,25          | 14,77 | 14,47 | 15,13 | 14,72 | 15,08 |
| x          | 0,143          | 0,144 | 0,145 | 0,144 | 0,145 | 0,144 |
| y          | 0,089          | 0,084 | 0,082 | 0,084 | 0,088 | 0,090 |

приборе. Для этого все шесть полей делались одноцветными так, чтобы фильтры соответствующей цветности закрывали собой объективные диафрагмы *O* (рис. 1). Соотношение яркостей полей определялось с помощью серых клише. Такая градуировка включала в себя все яркостные различия в оптическом ходе лучей, различия коэффициентов пропускания оптических деталей и цветных стекол, неравномерность яркости стенок осветителя и пр.

Прибор был проверен в отношении даваемой им колориметрической точности. При установлении колориметрического равенства для всех шести полей определялось совпадение результатов, даваемых всеми шестью рамками и разброс случайных погрешностей. Такая проверка была сделана при измерении „белого цвета“ и трех малонасыщенных цветов: розового, зеленого и голубого. Координаты измеренных цветов даны в табл. 2 и на рис. 5. (Для рамки № 5 указана средняя арифметическая погрешность из пяти измерений каждой координаты.) Они показывают, что расхождение результатов при измерении цвета разными рамками несколько больше, чем погрешность колориметрических измерений. Некоторые систематические отклонения дает рамка № 2 (по цветности) и рамка № 6 (по яркости). Уклонения показаний рамки

№ 6 могут быть объяснены погрешностью яркостной градуировки; уклонения рамки № 2 не могут быть объяснены небольшим отличием цветности ее красного светофильтра, так как расхождение результатов оставалось и при перестановке рамок местами. Повидимому, причина заключается в оптическом смещении пучков и происходит из-за неоднородности яркости различных зон линз, которая не может быть учтена яркостной градуировкой. Впрочем, расхождения не превышают тех различий, которые возможны для различных наблюдателей с нормальным цветным зрением, и не могли являться помехой при выполнении адапционных измерений, значительно менее точных, чем колориметрические.

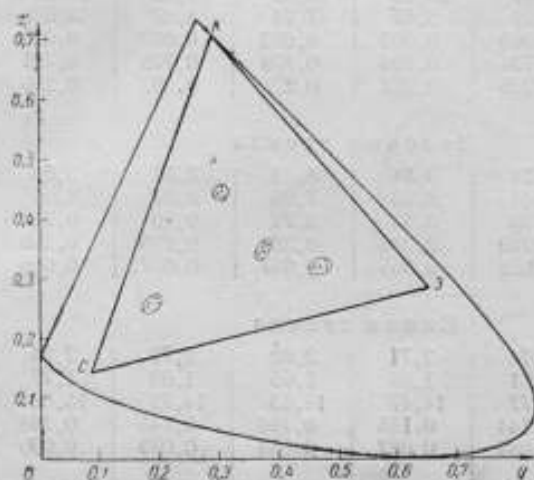


Рис. 5. Разброс в измерениях цвета различными рамками прибора.

Остановимся далее на некоторых недостатках прибора. Одним существенным недостатком является невозможность получения колориметрических полей высокой яркости. Максимальные яркости колориметрических полей—0,004 *сб* и полей адаптации—3 *сб*.

Второй существенный недостаток прибора заключается в креплении призм, создающих поля адаптации. Когда отодвигаются поля адаптации, за ними следует узкая черная полоска—край держателя призм. При мгновенной замене полей этот недостаток не имеет существенного значения, но неприятен при предварительном подборе зрительных равенств.

Можно еще отметить один недостаток прибора—инородное кольцо в окружающем фоне, образованное изображением полей зрения прибора в зеркальной поверхности конуса. Оно проходит приблизительно в  $\frac{3}{4}$  радиуса от центра засвечиваемой зоны.

Конструкция прибора осуществлялась по идее Н. Д. Нюберга. Д. И. Демкина и Г. Н. Раутная также давали советы и указания.

## 2. Исследование преобразований цветового пространства

Первые опыты по исследованию преобразований цветового пространства состояли в определении смещений колориметрических равенств под влиянием изменения адаптации на смежных участках сетчатки глаза. Целью этих наблюдений являлось выяснение



Сравнение средних результатов измерения для шести рамок

| Координаты<br>цвета | Р а з м е к и  |       |       |       |               |       | Р а з м е к и |       |       |       |               |       |
|---------------------|----------------|-------|-------|-------|---------------|-------|---------------|-------|-------|-------|---------------|-------|
|                     | № 1            | № 2   | № 3   | № 4   | № 5           | № 6   | № 1           | № 2   | № 3   | № 4   | № 5           | № 6   |
|                     | Голубой        |       |       |       |               |       | Розовый       |       |       |       |               |       |
| X                   | 4,49           | 4,71  | 4,42  | 4,33  | 4,64 ± 0,13   | 4,73  | 8,55          | 8,75  | 8,28  | 8,64  | 8,65 ± 0,29   | 8,85  |
| Y                   | 4,94           | 5,22  | 5,15  | 4,78  | 5,10 ± 0,16   | 5,21  | 5,79          | 5,94  | 5,85  | 5,86  | 5,92 ± 0,19   | 6,18  |
| Z                   | 7,94           | 7,50  | 7,47  | 7,87  | 7,66 ± 0,18   | 9,08  | 5,14          | 4,66  | 4,81  | 5,09  | 4,76 ± 0,13   | 5,30  |
| x                   | 0,259          | 0,270 | 0,259 | 0,255 | 0,267 ± 0,002 | 0,248 | 0,438         | 0,452 | 0,437 | 0,441 | 0,447 ± 0,005 | 0,436 |
| y                   | 0,284          | 0,299 | 0,302 | 0,282 | 0,293 ± 0,003 | 0,275 | 0,297         | 0,307 | 0,309 | 0,299 | 0,306 ± 0,002 | 0,304 |
|                     | Бледно-зеленый |       |       |       |               |       | Белый         |       |       |       |               |       |
| X                   | 4,72           | 4,58  | 4,36  | 4,55  | 4,61 ± 0,15   | 4,82  | 5,63          | 5,76  | 5,66  | 5,68  | 5,74 ± 0,18   | 5,80  |
| Y                   | 6,75           | 6,68  | 6,63  | 6,96  | 6,75 ± 0,18   | 6,92  | 6,10          | 6,16  | 6,13  | 6,17  | 6,03 ± 0,19   | 6,29  |
| Z                   | 3,40           | 2,64  | 2,71  | 2,89  | 3,00 ± 0,20   | 3,33  | 4,95          | 4,15  | 4,58  | 4,59  | 4,30 ± 0,15   | 5,10  |
| x                   | 0,317          | 0,330 | 0,318 | 0,316 | 0,320 ± 0,008 | 0,319 | 0,337         | 0,358 | 0,351 | 0,346 | 0,356 ± 0,004 | 0,338 |
| y                   | 0,453          | 0,480 | 0,483 | 0,483 | 0,468 ± 0,008 | 0,458 | 0,366         | 0,383 | 0,375 | 0,375 | 0,376 ± 0,001 | 0,366 |

Примечание. Каждое число — средний результат пяти наблюдений.

характера и величины цветовых изменений и попытка определения цветов основных приемников глаза.

Опыты, проводимые по методике, разработанной Н. Д. Ньюбергом [1], заключались в установлении одновременного равенства по ощущению между правым и левым полем каждой пары  $\beta$  (рис. 6) после предварительной адаптации глаза к полям  $\alpha$ .

Такие равенства достигались не сразу, а после целого ряда предварительных проб. В результате для любого адаптационного различия на сетчатке получались три зрительных равенства, которые можно записать в виде:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Цвет } A_1 & \text{зрительно равен} & \text{цвету} & B_1, & & & \\ " & A_2 & " & " & " & B_2, & \\ " & A_3 & " & " & " & B_3. & \end{array}$$

Полученные таким образом результаты можно трактовать как преобразование трех цветов при переходе от одного состояния адаптации к другому. Тем самым физиологический процесс пре-

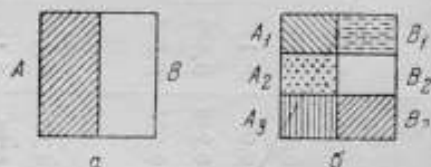


Рис. 6. Поля сравнения прибора.

$\alpha$  — поля адаптации;  $\beta$  — колориметрические поля.

образования цветовых ощущений мы описываем как преобразование физического пространства цветов (стимулов).

Предварительные опыты, выполненные Н. Д. Ньюбергом [1] на карточках цветового каталога Оствальда, показали, что эти преобразования являются линейными, на что имеются также косвенные указания в работах Райта [4]. В силу этого каждое цветовое равенство, установленное при данном адаптационном различии и рассматриваемое как адаптационное преобразование, можно записать в виде линейного преобразования:

$$\xi = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z,$$

$$\eta = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z,$$

$$\zeta = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z,$$

где  $\xi, \eta, \zeta$  — координаты цвета  $A$ , а  $x, y, z$  — координаты цвета  $B$ , например, в системе цветов нашего прибора.

Отсюда видно, что установление зрительного равенства трех пар полей при одном и том же адаптационном различии в принципе достаточно для определения девяти коэффициентов линейного преобразования. Если линейные преобразования обнаруживают инвариантные оси, то очевидно, что эти оси должны соответство-

вать цветностям основных приемников Юнга-Гельмгольца. Всякое цветовое преобразование в результате изменения состояния адаптации глаза в системе инвариантных осей сводится лишь к изменению масштабов по осям, а сами масштабы характеризуют состояние чувствительности приемников.

В качестве адаптационных полей было выбрано несколько пар цветов и для соответствующих различий адаптации подбирались 10—15 зрительных равенств.

Порядок проведения экспериментов был следующим. Перед началом измерений устанавливались цвета для полей адаптации с помощью цветных светофильтров. Цвета подбирались таким образом, чтобы на двух соответствующих участках сетчатки создавалось резко выраженное различие адаптации. Далее поля зрения задвигались белым экраном, и наблюдатель смотрел через окуляр на ровное белое поле. По истечении примерно пяти минут наблюдатель опускал белый экран и смотрел на поля адаптации в течение некоторого времени, фиксируя границу раздела. В результате на соответствующих участках сетчатки глаза создавалось различие состояний адаптации. Затем, смещая вниз поля адаптации, наблюдатель открывал первую верхнюю пару колориметрических полей. Цвет одного колориметрического поля устанавливался заранее произвольным, но так, чтобы для данного различия адаптаций на соседнем поле прибора можно было подобрать цвет, по ощущению ему равный.

В первые моменты, порядка десятых долей секунды, после смены полей адаптации колориметрическими полями наблюдались неуловимые мелькания или цветовые наплывы, и только после этого глаз приобретал возможность суждения о равенстве или неравенстве. Если при этом наблюдатель отмечал небольшое неравенство, то все же за очень короткий промежуток времени оно само собой исчезало, и установившееся равенство в дальнейшем устойчиво сохранялось в течение 30—40 сек. Исчезновение слабого начального неравенства создавало у наблюдателя ощущение неуверенности в своих оценках. Практически установка каждого зрительного равенства достигалась лишь после многократных замен полей адаптаций полями сравнения и обратно и занимала 15—20 мин.

Время адаптации специально не регистрировалось и для каждой выбранной пары цветов адаптации определялось необходимостью создания такого различия адаптации на сетчатке, которое позволяло подбирать зрительные равенства в пределах цветового треугольника прибора. Это время менялось от 5 до 10 сек. в зависимости от яркости и цвета полей адаптации.

Подобным же способом путем ряда проб достигалось зрительное равенство двух других пар колориметрических полей при сохранении зрительного равенства на первой паре, которая таким образом характеризовала данное различие адаптаций и являлась контрольной. Грубые предварительные установки равенства, как правило, делались одним глазом, чтобы не утомлять второй глаз, предназначенный для окончательной проверки одновременного равенства всех трех полей. При этом соблюдалась строгая фиксация глаза

на фиксационную точку, находящуюся в центре полей. После грубых установок равенство уточнялось другим глазом при повторении всего эксперимента до тех пор, пока результат не считался удовлетворительным. Только после этого записывались отсчеты по шкалам колориметров.

Сохраняя первую пару в качестве контрольной, можно было для того же различия адаптации установить зрительные равенства

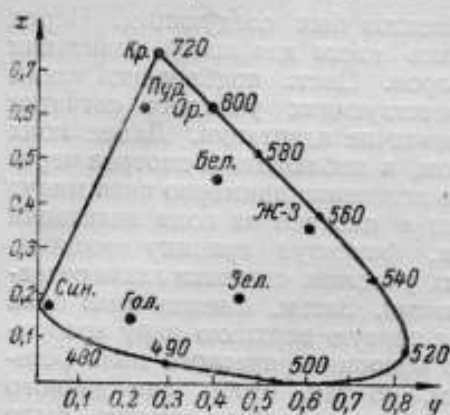


Рис. 7. Цветовые характеристики светофильтров.

многих других пар и этим самым экспериментально получить картину преобразования многих цветов при одном и том же адапционном различии. Такого рода измерения цветовых преобразований были выполнены для нескольких случаев различной адаптации, как-то: красная—синяя, красная—зеленая, пурпурная—желтая, оранжевая—голубая, синяя—белая, красная—белая, зеленая—белая, пурпурная—белая. Цветовые характеристики соответствующих светофильтров приводятся в табл. 3 и на рис. 7.

Полученные в результате измерений координаты цветов в системе  $K, Z$  и  $C$  прибора переводились в систему приемников Кёнига на основании кривых сложения системы Кёнига-Айвса для источника  $2900^\circ K$  спектральных характеристик светофильтров прибора.

В табл. 4 в качестве примера приведены координаты цвета  $R, G, B$ , а также координаты цветности  $r, g$  для многих пар раз-

Таблица 3

Цветовые характеристики светофильтров для создания полей адаптации

| Цвет                    | Координаты |      | Яркость<br>$B, cb$ | Примечание   |
|-------------------------|------------|------|--------------------|--|
|                         | $x$        | $y$  |                    |  |
| Красный . . . . .       | 0,72       | 0,28 | 0,04               | Цветовая температура источника света $2900^\circ K$      |
| Оранжевый . . . . .     | 0,60       | 0,41 | 0,05               |  |
| Желто-зеленый . . . . . | 0,34       | 0,61 | 0,2                |  |
| Зеленый . . . . .       | 0,18       | 0,45 | 0,02               |  |
| Голубой . . . . .       | 0,14       | 0,21 | 0,03               |  |
| Синий . . . . .         | 0,16       | 0,02 | 0,007              |  |
| Пурпурный . . . . .     | 0,60       | 0,25 | 0,10               |  |
| Белый . . . . .         | 0,48       | 0,41 |                    |  |
|                         |            |      |                    | Яркость белого подбиралась равной яркости соседнего поля |

личных цветов, дающих зрительное равенство при перечисленных выше адапционных различиях. Запись в табл. 4 сделана так, чтобы первый из уравниваемых цветов рассматривался участком сетчатки, адаптированным ко второму из указанных в названии таблицы цветов адаптации. В первой графе приведены

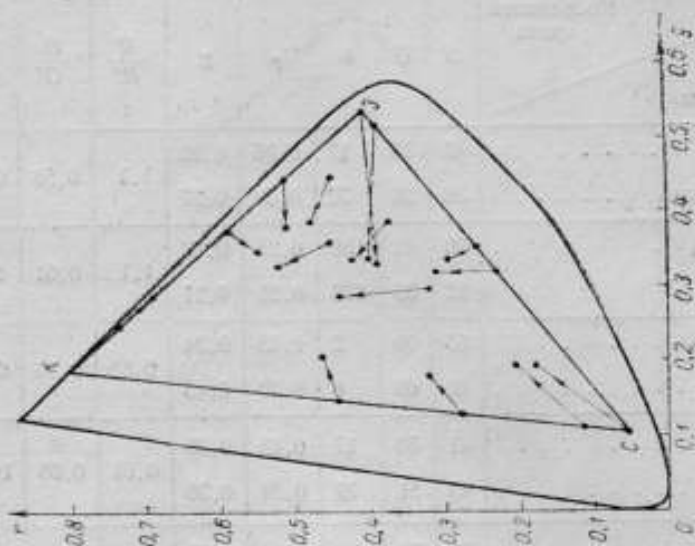


Рис. 9. Преобразование цвета под влиянием адаптации. Цвета адаптации: белый — зеленый.

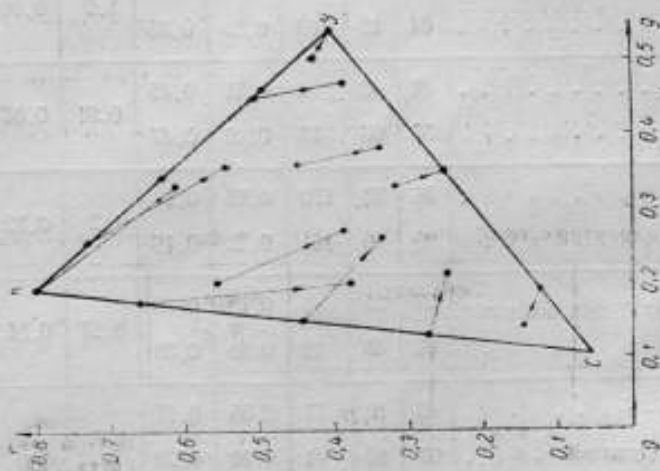


Рис. 8. Преобразование цвета под влиянием адаптации. Цвета адаптации: белый — красный.

названия уравниваемых цветов по тому ощущению, которое они вызывают для „неадаптированного“ глаза. Таблица содержит результаты цветовых преобразований при переходе от „белой“ адаптации к цветной. Результаты этих и других преобразований приведены на графиках цветности (рис. 8—11).

Так как состояние адаптации глаза к „белому“ является наиболее распространенным, то условно его можно считать „нор-

## Преобразование цвета под влиянием адаптации

Цвета адаптации: белый—красный

| Цвета<br>сравнения           | Координаты<br>цвета |     |     |      |      | $\frac{R}{R'}$ | $\frac{G}{G'}$ | $\frac{B}{B'}$ |
|------------------------------|---------------------|-----|-----|------|------|----------------|----------------|----------------|
|                              | $R$                 | $G$ | $B$ | $r$  | $g$  |                |                |                |
| Красный . . . . .            | 42                  | 15  | 17  | 0,56 | 0,20 | 1,1            | 0,58           | 0,53           |
| Темнокрасный . . . . .       | 38                  | 26  | 32  | 0,39 | 0,27 |                |                |                |
| Пурпурный . . . . .          | 90                  | 42  | 189 | 0,28 | 0,13 | 1,1            | 0,61           | 1,1            |
| Голубой . . . . .            | 82                  | 69  | 176 | 0,25 | 0,21 |                |                |                |
| Оранжевый . . . . .          | 55                  | 30  | 2   | 0,63 | 0,34 | 0,85           | 0,50           | 0,33           |
| Желтый . . . . .             | 65                  | 60  | 6   | 0,50 | 0,46 |                |                |                |
| Белый . . . . .              | 41                  | 33  | 17  | 0,45 | 0,36 | 0,91           | 0,65           | 0,66           |
| Голубой . . . . .            | 45                  | 51  | 37  | 0,34 | 0,38 |                |                |                |
| Бледно голубой . . . . .     | 75                  | 78  | 83  | 0,32 | 0,33 | 1,2            | 0,90           | 0,80           |
| Голубой . . . . .            | 64                  | 89  | 103 | 0,25 | 0,35 |                |                |                |
| Желтый . . . . .             | 48                  | 43  | 4   | 0,51 | 0,45 | 0,91           | 0,68           | 0,22           |
| Зеленый . . . . .            | 53                  | 63  | 18  | 0,40 | 0,47 |                |                |                |
| Лиловый . . . . .            | 35                  | 33  | 170 | 0,15 | 0,14 | 1,2            | 0,72           | 1,05           |
| Голубой . . . . .            | 29                  | 46  | 161 | 0,12 | 0,19 |                |                |                |
| Красный . . . . .            | 67                  | 23  | 1   | 0,73 | 0,25 | 0,97           | 0,51           | 0,08           |
| Оранжевый . . . . .          | 69                  | 45  | 12  | 0,55 | 0,36 |                |                |                |
| Малиновый . . . . .          | 40                  | 10  | 11  | 0,66 | 0,17 | 1,1            | 0,55           | 0,26           |
| Сиреневый (темный) . . . . . | 37                  | 19  | 41  | 0,38 | 0,20 |                |                |                |
| Пурпурный . . . . .          | 74                  | 25  | 69  | 0,44 | 0,15 | 1,2            | 0,54           | 0,96           |
| Сиреневый . . . . .          | 60                  | 46  | 72  | 0,34 | 0,26 |                |                |                |
| Красный . . . . .            | 84                  | 30  | 0,1 | 0,81 | 0,19 | 1,2            | 0,53           | 0,02           |
| Оранжевый . . . . .          | 72                  | 38  | 5,4 | 0,63 | 0,33 |                |                |                |

мальным», и тогда графики наглядно представляют, как должно изменяться качество цветового ощущения при переходе от нор-

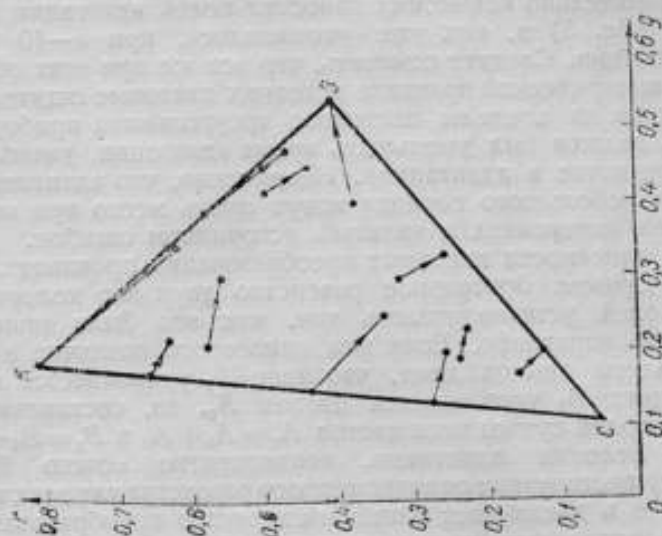


Рис. 11. Преобразование цвета под влиянием адаптации. Цвета адаптации: белый — пурпурный.

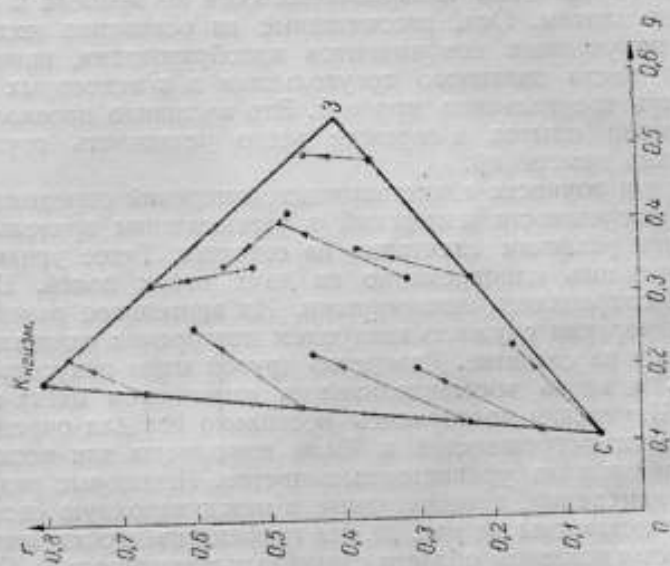


Рис. 10. Преобразование цвета под влиянием адаптации. Цвета адаптации: белый — синий.

мальной адаптации глаза к цветной. Направление этих изменений указано стрелками.

Рис. 12 содержит подобные же результаты для перехода между состояниями различных цветовых адаптаций. На графике зрительно равные пары цветов для разных адаптационных различий отмечены разными значками и тоже соединены прямыми со стрелками.

Все эти данные показывают изменение в субъективном восприятии цвета под влиянием адаптации. Наблюдения производились при сравнительно невысоких яркостях полей адаптации (как показывает табл. 3) и, как уже упоминалось, при 5—10 сек. времени адаптации. Следует отметить, что все же при этих обычных в колориметрической практике условиях цветовые ощущения часто выходили за пределы цветового треугольника прибора и наблюдатель должен был уменьшать время адаптации, уменьшая тем самым различие в адаптациях. Несомненно, что адаптационные различия небольшого порядка могут иметь место при колориметрических измерениях и являться источником ошибок.

Проверка линейности цветовых преобразований производилась следующим образом. Зрительное равенство двух пар колориметрических полей устанавливалось так, как это было описано в предыдущем параграфе. Если для некоторого различия адаптации результаты опытов дают, что цвет  $A_1$  уравнивается цветом  $B_1$ , а цвет  $A_2$  уравнивается цветом  $B_2$ , то, составляя из третьей пары полей суммы этих цветов  $A_n = A_1 + A_2$  и  $B_n = B_1 + B_2$  и повторяя условия адаптации, неоднократно можно было убедиться в существовании одновременного равенства для всех трех пар полей. Это и доказывает линейный характер преобразования.

Попытка определения инвариантных осей не привела к ожидаемым результатам. Оси, рассчитанные на основании экспериментально полученных коэффициентов преобразования, попадали в различные места цветового треугольника и в некоторых случаях — внутрь треугольника прибора. Это заставило проанализировать условия опытов и прежде всего установить точность адаптационных измерений.

Для оценки точности адаптационных измерений определялись случайные погрешности измерений в установлении зрительного равенства при различии адаптации на сетчатке. Такое уравнивание производилось одновременно на двух парах полей. Цвета одной пары сохранялись неизменными. Их зрительное равенство в момент измерения служило контролем повторения адаптационного различия на сетчатке. Равенство другой пары искусственно нарушалось и вновь восстанавливалось изменением цвета поля сравнения. Измерения повторялись несколько раз для определения случайных погрешностей и были выполнены для нескольких адаптаций и ряда уравниваемых цветов. Некоторые результаты таких измерений, пересчитанные в международную систему  $X, Y, Z$ , представлены на рис. 13. На графике цветности замкнутыми контурами показаны области случайных погрешностей. Сравнивая эти результаты с погрешностями обычных колориметрических измерений для данного прибора, можно убедиться, что адаптационные измерения, как и следовало ожидать, значительно грубее обычных колориметрических. Отметим, что увеличение случайных погрешностей отчасти вызывается тем обстоятельством, что данные адаптационных измерений получаются в результате двух независимых установок на равенство контрольной пары и измеряемой пары полей.



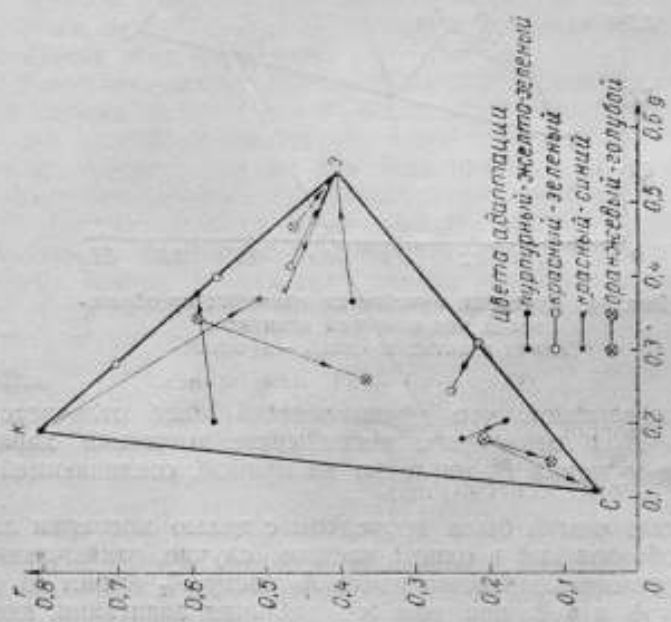


Рис. 12. Преобразование цвета под влиянием адаптации.

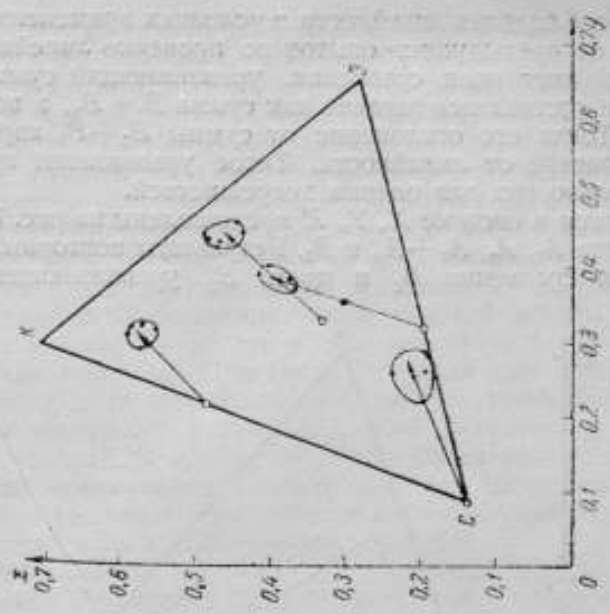


Рис. 13. Случайные погрешности адаптационных измерений. Цвета адаптации: белый — синий.

Анализируя ход и результаты вычислений, производимых при определении инвариантных осей, можно убедиться в том, что неудовлетворительные результаты не могут быть отнесены за счет случайных погрешностей. Тогда было решено еще раз произвести проверку линейности адаптационных преобразований

и точности соблюдения линейности в условиях применения метода. В отличие от предыдущих опытов по проверке линейности преобразований цвет поля сравнения, уравнивающий сумму цветов  $A_1 + A_2$ , не составлялся заранее как сумма  $B_1 + B_2$ , а подбирался на опыте. Тогда его отклонение от суммы  $B_1 + B_2$  характеризовало отклонение от линейности. Такое уравнивание производилось несколько раз для оценки погрешностей.

Результаты в системе  $X, Y, Z$  представлены на рис. 14, где заданные цвета  $A_1, A_2, A_1 + A_2$  и  $B_1$ . Результаты повторных измерений цветов сравнения  $B_2$  и цвета  $B_3$ , уравнивающего сумму

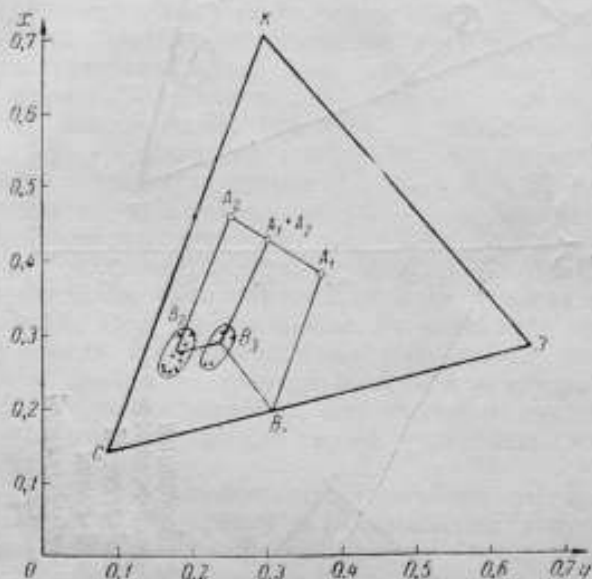


Рис. 14. Проверка линейности цветовых преобразований под влиянием адаптации. Цвета адаптации: синий — красный.

$A_1 + A_2$ , показывают, что уравнивающий цвет отличается от суммы  $B_1 + B_2$  и отклонение носит систематический характер; измеренные значения  $B_2$  не лежат на прямой, соединяющей точки  $B_1$  и  $B_2$ .

Некоторые опыты были проведены с целью проверки линейности преобразований в одном частном случае, заключающемся в том, что условие равенства цвета  $A_1$  цвету  $A_2$  влечет за собой равенство  $\alpha A_1$  и  $\alpha A_2$  при том же различии адаптации, где  $\alpha$  — численный множитель. Проверка производилась попутно с измерениями адаптационных преобразований. Для этого установка зрительных равенств при заданном различии адаптации производилась на различных уровнях яркости, которые осуществлялись различным положением серых клиньев прибора. Разность между оптическими плотностями серых клиньев в обоих полях прибора

остается действительно практически постоянной, независимо от уровня яркости сравниваемых полей.

Исследование процесса адаптации носит специфический характер в том отношении, что здесь глаз является предметом измерения и измерительным прибором. Правда, эти различные функции в некоторой мере разделены между различными участками сетчатки, но тем не менее всякий акт измерения оказывает возмущение и на наблюдаемый процесс и на состояние участка сетчатки глаза, условно принятое за нормальное. Результаты измерений также подвержены колебаниям, главным образом в силу трудности воспроизведения условий измерения. Все это приводит к большим погрешностям результатов и часто к систематическим ошибкам. При таких условиях для достоверных выводов необходимо накопление большого количества экспериментального материала и подтверждение результатов различными исследователями. К сожалению, экспериментальные исследования адаптации чрезвычайно утомительны для глаз, связаны с большим напряжением и требуют продолжительных перерывов для приведения глаза в нормальное состояние.

Систематическое нарушение линейности адаптационных преобразований в условиях данных измерений и одновременно с тем удовлетворительность зрительного равенства заранее составленных сумм  $A_1 + A_2$  и  $B_1 + B_2$  заставили проанализировать различия в условиях этих измерений.

Применявшаяся методика наблюдений предполагала, что в момент оценки равенства все левые поля находятся при одном и том же состоянии адаптации, а все правые поля — при другом, но тоже одном и том же для всех правых полей. Это различие состояний создавалось предварительной адаптацией.

В действительности сами колориметрические поля создают добавочную адаптацию, различную для всех шести участков цветных полей. Так как сама оценка равенства занимает некоторый, хотя и малый, промежуток времени, то затруднительно судить, к какому состоянию адаптации относится зрительное равенство, тем более, что в начальной стадии процесс адаптации протекает чрезвычайно быстро. Вполне вероятно, что момент оценки соответствует некоторому суммарному состоянию адаптации, получающемуся наложением адаптации к колориметрическим полям на предварительную адаптацию. Чтобы проверить это, достаточно наблюдать последовательные образы на белом экране. Сразу же после адаптации и оценки зрительного равенства наблюдатель быстро задвигал поля белым экраном. На этом экране отражалось состояние адаптации сетчатки глаза. Виделся отпечаток всего окошечка полей зрения, состоящий из шести разноокрашенных участков вместо пары продольных полос, отвечающих полям адаптации. При дальнейшем рассмотрении эта решетка колориметрических полей быстро смывалась, и вновь отчетливо выступали последовательные образы, соответствующие основной, более сильной адаптации. Чем больше различались по цвету колориметрические поля, тем большее искажение они вносили

в состояние предварительной адаптации. Повидимому, это обстоятельство и явилось одной из причин кажущегося нарушения линейности и неудачи в нахождении приемников. На рис. 14 видно, что цвет, уравнивающий сумму  $A_1 + A_2$ , всегда смещается от  $B_1 + B_2$  в сторону  $A_1 + A_2$ . Естественно полагая, что степень адаптации к измеряемым полям определяется яркостью этих полей и приняв во внимание систематический характер нарушения линейности, можно заключить, что адаптация к измеряемым полям сглаживает их первоначальные цветовые различия. Это подтверждается отмеченным ранее исчезновением начальных малых цветовых различий в процессе установления зрительного равенства.

Устойчивость зрительного равенства, длящегося в течение 30—40 сек., подтверждает одно из положений Н. Д. Ньюберга [1], состоящее в том, что „изменение ощущения есть функция только ощущения“. Следовательно, раз установленное зрительное равенство не должно нарушаться при дальнейшем его рассматривании. Наблюдаемое все же по истечении 30—40 сек. нарушение равенства Н. Д. Ньюберг объясняет произвольным движением глаза, т. е. нарушением фиксации.

Некоторые специальные наблюдения и их результаты говорят в пользу соображений Н. Д. Ньюберга. Например, убедительным является следующий опыт. Установим зрительное равенство на одной паре полей в условиях различия адаптации, а на соседней паре полей поставим объективно одинаковые белые цвета. В силу различия адаптации они будут восприниматься как неравные и окрашенные в дополнительные цвета к цветам адаптации. Мы наблюдаем так называемые отрицательные последовательные образы. Фиксируя глаз в центре обеих пар, можно наблюдать, как последовательные образы постепенно смываются и их исчезновение отмечает нам исчезновение первоначальных адаптационных различий на сетчатке. Тем не менее ранее установленное зрительное равенство на первой паре полей сохраняется. Это явление наблюдалось при малом различии колориметрических полей. При больших различиях адаптации и, следовательно, большом различии наблюдаемых цветов нарушение зрительного равенства происходило ранее исчезновения адаптационных образов.

Теперь вернемся к рассмотрению табл. 4, представляющей результаты цветовых преобразований. В трех последних графах таблицы приведены отношения  $\frac{R}{R'}, \frac{G}{G'}, \frac{B}{B'}$ , где  $R, G, B$  и  $R', G', B'$  — соответствующие координаты цветов в системе Кёнига, дающие зрительное равенство для данного различия адаптации. Эти отношения для каждого случая адаптации приблизительно сохраняются постоянными для красной и зеленой координат; отношение же  $\frac{B}{B'}$  не обнаруживает такого постоянства.

Таким образом, хотя опытные данные и не позволили определить точное положение приемников, все же они показывают,

что изменение состояния адаптации приблизительно характеризуется изменением чувствительности приемников и что физиологические приемники во всяком случае близки к приемникам  $R$  и  $G$  Кёнига.

Непостоянство  $\frac{B}{B'}$  может быть вызвано или неточным определением синего приемника, намеченного Кёнигом очень грубо, или его аномальным характером. Действительно, во всех предыдущих исследованиях (Кёнига [7], Эбнея [8], Райта [4]) отмечается аномальное поведение синего приемника. Характерным является также тот факт, что явление слепоты к синим цветам наблюдается только в случае болезни глаз.

Все это указывает на особую природу синего приемника, отличающую его от двух других. Из данных Райта [4], например, можно заключить, что в обычных условиях адаптации чувствительность синего приемника сильно понижена. Это обстоятельство говорит в пользу высказанного Бумом предположения о связи синего приемника с работой палочкового аппарата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Д. Нюберг, „Труды I Конференции по физиологической оптике“, 1936.
2. W. D. Wright, „Brit. J. Physiol.“, 1936, 87.
3. Е. Н. Юстова, „Ж. Т. Ф.“, 1946, т. XVI, в. 10, стр. 1184.
4. W. D. Wright, Proc. Royal Society, ser. B, 1934, v. 115.
5. Г. Н. Раутиан, „Труды I Конференции по физиологической оптике“, 1936.
6. Л. И. Демкина, „Труды ГОИ“, 1932, т. 8, вып. 82.
7. A. König, Gesammelte Abhandlungen, 1903.
8. W. Abney, Researches in Colour Vision, 1913.



## СОДЕРЖАНИЕ

|  | Стр. |
|--|------|
| В. Е. Карташевская. Осуществление образцовой лампы для распределения лучистой мощности в области видимого спектра . . .  | 3    |
| В. Е. Карташевская. Установление эталона-кошки нового основного светового эталона для единицы светового потока . . . . . | 45   |
| А. М. Сабуренков. Световые измерения люминесцентных ламп . .   | 59   |
| А. М. Сабуренков. Измерение переменных световых величин (в применении к люминесцентным лампам) . . . . .                 | 87   |
| Е. Н. Юстова. Исследование изменения пространства цветовых восприятий под влиянием адаптации глаза                       |      |
| 1. Прибор для колориметрического исследования влияния цветовой адаптации глаза . . . . .                                 | 102  |
| 2. Исследование преобразований цветового пространства . . .  | 112  |

Ответств. ред. *проф. Б. М. Яновский*  
Технич. редактор *Е. В. Климина*  
Корректор *Н. А. Кнохе*

---

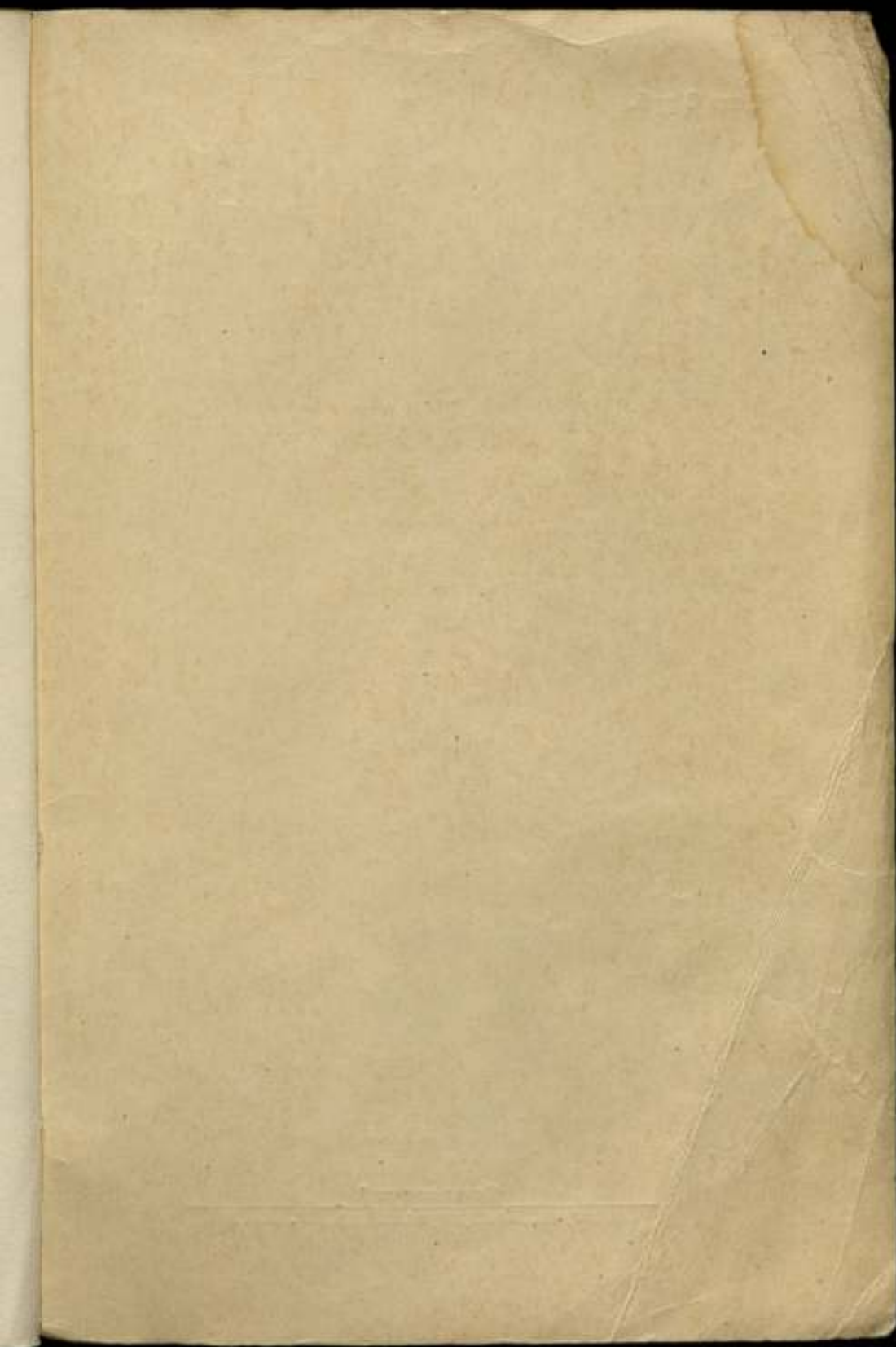
Печ. листов 8. Подписано к печати  
22.XI.49 г. М-33465. Тираж 1200.  
Зак. № 1090.

---

Типография № 3 Управления изда-  
тельств и полиграфии Исполкома  
Ленгорсовета

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY  
540 EAST 57TH STREET  
CHICAGO, ILL. 60637  
U.S.A.





Цена 8 руб.

Склад изданий

Ленинград, Межаународный пр., 19. ВНИИМ