

Н.Т. Федоров

**Современное состояние
колориметрии**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Н11

Н11 **Н.Т. Федоров**
Современное состояние колориметрии / Н.Т. Федоров – М.: Книга по Требо-
ванию, 2021. – 193 с.

ISBN 978-5-458-57588-1

ISBN 978-5-458-57588-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Введение

В то время как в других областях измерительной физики мы имеем установленными и методы измерения и терминологию, в области колориметрии до последнего времени дело обстояло гораздо хуже. Во введении к отчету Комитета по колориметрии при Американском оптическом обществе, составленном проф. Л. Тролендом (Troland) при участии лучших колориметристов Америки: Айвса, Джоуиза, Приста и Уивера, опубликованном в 1922 г. и посвященном номенклатуре, стандартным психофизическим данным, физическим стандартам и методам колориметрических измерений, указывается, что вопрос о номенклатуре и стандартах в колориметрии находится в чрезвычайно неудовлетворительном состоянии и что на рекомендуемую ими терминологию следует смотреть лишь как на первый опыт. Далее, они пишут, что неполнота и несовершенство констант и методов цветоведения совершенно очевидны для Комитета, который ясно сознает, что еще весьма много должно быть добавлено к сделанному и внесены многочисленные изменения раньше, чем поставленная им цель может считаться достигнутой.

А между тем потребность в рациональной терминологии, простых и точных методах измерения цвета и в рациональном и достаточно богатом по числу цветов цветовом теле в настоящее время остро ощущается в целом ряде отраслей нашей и зарубежной промышленности. На первое место здесь должны быть поставлены текстильная, светотехническая, анилинокрасочная и лакокрасочная промышленность; за ними идут полиграфическая, керамическая, наконец, агрономия, архитектура, военное дело и т. п. В Европе и Америке потребность эта кроме создания вышеуказанного Комитета по колориметрии послужила стимулом к созданию целого ряда атласов цветов (Менсела, Оствальда, Риджвея и др.), которые, однако, все же не дают удовлетворительного разрешения проблемы создания рационального цветового тела.

Объясняется это тем, что до последнего времени не было достаточно разработанных теоретических основ для такого

построения. В настоящее же время основы эти уже даны в работах одного из лучших теоретиков нашего времени, профессора Берлинского университета Э. Шредингера, известного физико-химика проф. Р. Лютера (Дрезден), З. Реша, Гилда и др.

Построение цветового тела является в настоящее время вполне осуществимой, ясной в своих основных чертах и технически не требующей больших средств задачей.

В этой книге я, опираясь, главным образом, на работы Шредингера, дам общий очерк современного состояния колориметрии и проблемы построения цветового тела.

Основы всего стройного здания современного измерительного учения о цветах были заложены еще Ньютоном, укреплены и расширены Максвеллом в его классических мемуарах о смешении цветов, первый из которых появился в 1855 г.

Дальнейшее развитие этой науки через классические исследования Гельмгольца, Кенига и Дитеричи, Фр. Экснера, Айвса и др. приводит к четырем замечательным мемуарам Э. Шредингера, впервые с чрезвычайной ясностью показавшего, что законы смешения цветов могут быть установлены совершенно независимо от вопроса о яркости различных цветов, образуя вполне замкнутый в себе комплекс фактов, названный им *низшей метрикой цвета*, в противоположность *высшей метрике цвета*, обнимающей вопросы гетерохромной фотометрии, чувствительности глаза к изменению цветности и т. п.¹

Глубокое различие по существу между низшей и высшей метрикой цвета сводится к следующему.

В отличие от других областей измерительной физики, где мы имеем всегда дело лишь с *пространственно-временными* совпадениями (стрелки зайчика, вершины ртутного столбика с тем или иным делением шкалы, изображения креста нитей с изображением той или иной звезды и т. п.) или, наконец, с временным совпадением двух подобных пространственных совпадений и т. п., — в каждом измерении цвета мы имеем, кроме установок этого рода, еще по крайней мере одну установку совершенно особого рода. В простейшем случае эта установка состоит в том, что два смежные цветовые поля при некотором определенном значении того или иного переменного параметра аппаратуры (угол поворота николя, величина диафрагмы, положение коллиматора и т. п.) делаются для нас в отношении их

¹ К сожалению, до сих пор это разделение еще не проводится с достаточной строгостью даже в таких прекрасных курсах, как «Photometry» Уолша.

цвета неразличимыми, — в том, следовательно, что мы констатируем совпадение по цвету с одним из совпадений первого рода. В других случаях, как, например, при изучении нашей способности к различению цветности, мы, наоборот, исходим из положения полного равенства, изменяя один из физических параметров до тех пор, пока не получим *едва заметного различия* полей. Далее, в некоторых методах гетерохромной фотометрии, например, мы имеем дело с установкой не на равенство полей, но на их *наибольшее сходство*, и наконец, возможна еще установка на *наибольшее различие, наибольший контраст*. Этими четырьмя видами установок и исчерпываются все возможные случаи.

Результаты измерений первого рода подчиняются чрезвычайно простым закономерностям, установленным формально еще Грассманом, причем систему этих закономерностей — обычные законы смещения цветов — Шредингер и называет *низшей метрикой цвета*, в отличие от гораздо более сложных и гораздо менее изученных законов *высшей* метрики цвета, которая занимается результатами измерений остальных родов.

С низшей метрики цвета, с которой мы постоянно имеем дело в колориметрической практике, мы и начнем наш обзор.

1. Низшая метрика цвета

а) Смещение цветов

В колориметрии мы изучаем цвета как таковые, не обращая внимания на их спектр. Это возможно потому, что многообразие всех цветов гораздо меньшего порядка, чем многообразие соответствующих им спектров, и один и тот же цвет может поэтому вызываться совершенно различными комбинациями спектральных лучей, как это видно, например, из таких примеров:

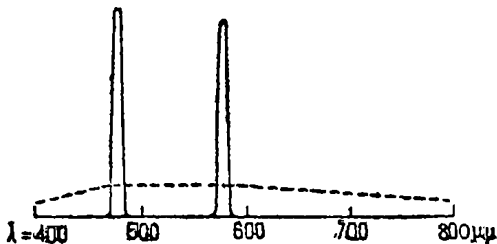


Рис. 1.

1) белый солнечный свет и белый свет, полученный от смешения двух дополнительных цветов (рис. 1), могут быть для глаза сделаны совершенно тождественными;

2) цвет зеленой линии таллия, смешанный с цветом красной

литиевой линии тождествен с цветом желтой натровой линии (с небольшой примесью белого) («уравнение Рэлея») (рис. 2).

Американский комитет по колориметрии предлагает поэтому следующие, чисто описательные, качественные определения основных свойств каждого цвета *без всякого соотношения к стимулу*:

1. «Светлота (Brilliance) есть качество любого цвета, в отношении которого его можно классифицировать как цвет, эквивалентный некоторому члену серии серых цветов между белым и черным.

2. Цветной тон есть качество некоторых цветов, в отношении которого они коренным образом отличаются от серого той же светлоты. Это качество позволяет классифицировать их как красноватые, желтоватые, зеленоватые или синеватые.

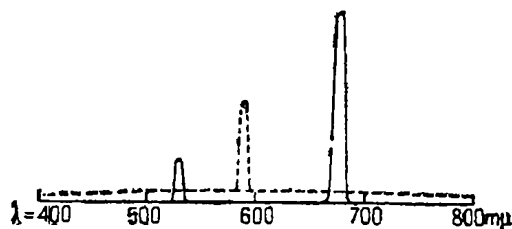


Рис. 2.

3. Насыщенность есть качество всех цветов, обладающих цветным тоном, которое опре-

деляет степень их различия от серого той же светлоты».

Эти определения можно было бы превратить в количественные, проделав огромную работу по измерению *порогов* как по цветному тону, так по светлоте и насыщенности, и определяя цвет *числом порогов* от черного до равносветлого с данным цветом серого (светлота), числом порогов от цвета до равносветлого с ним серого (насыщенность) и, наконец, числом порогов по цветовому тону, начиная от некоторого, принимаемого за начальный, цвета.

Все это относится, однако, к области высшей метрики.

В основе же низшей метрики лежат количественные опыты со смешением *спектральных* цветов, которые дают следующее. При смешении двух спектральных цветов, лежащих в спектре недалеко друг от друга, получаются цвета, имеющие одинаковый тон с цветами, лежащими в спектре *между* смешиваемыми, но менее по сравнению с ними насыщенные. Новых, не представленных в спектре, цветовых тонов при смешении соседних спектральных цветов не получается. Лишь при смешении двух спектральных цветов, лежащих в разных концах спектра, получаются цвета, не представленные в спектре, так называемые пурпурные, причем эти пурпурные цвета получаются тем более насыщенными, чем ближе к концам спектра лежат оба компонента.

При смешении же трех или большего числа спектральных цветов мы не получаем каких-либо новых цветов кроме выше-названных. И даже более: оказывается, что при надлежащем выборе этих трех спектральных цветов все остальные цвета можно получить из них смешением в надлежащих пропорциях. Следует заметить, впрочем, что ни при каком выборе этих спектральных цветов невозможно получить из них все остальные цвета в их полной насыщенности. Лучше всего удастся это, если за основные цвета взять крайние цвета спектра (красный и фиолетовый) и средний спектральный — зеленый. При помощи этих трех цветов можно точно воспроизвести, например, все пурпурные цвета и большую часть цветов окрашенных тел.

Из *опытного факта*, что все цвета возможно получить при помощи смешения трех основных, возникает тотчас возможность однозначной характеристики любого цвета тремя координатами. Это можно сделать следующим образом: для трех выбранных выше основных цветов: крайних спектральных красного и фиолетового и среднего спектрального зеленого, мы установим некоторые *произвольные единицы*. Далее, смешением этих трех основных цветов мы точно воспроизводим исследуемый цвет — составляем «цветовое уравнение». Очевидно тогда, что указание количеств x_1 , x_2 и x_3 основных цветов в смеси однозначно характеризует взятый цвет. Как упомянуто выше, в случае очень насыщенных цветов такое уравнение не всегда является возможным. Но в подобном случае всегда возможно, смешивая два основных цвета, воспроизвести *тон* анализируемого цвета, а затем, прибавив к *этому анализируемому цвету* третий основной цвет, получить полное цветовое тождество. В этом случае одна из координат будет отрицательной.

Таким образом каждому цвету можно созершенно однозначно приписать три координаты. Изменение этих координат в одном и том же отношении изменяет лишь *яркость* цвета (в том случае, разумеется, когда мы рассматриваем лишь дневное, цветное зрение), но не его качество. Поэтому для характеристики качества цвета (тона и насыщенности) достаточно указать лишь *отношение* трех его координат, т. е. лишь две координаты.

б) Основные цвета и кривые смешения

Законы смешения цветов являются также основой для наших представлений о физиологических процессах в глазу. Возможность получения всех цветов из трех основных приводит к естественному предположению; что также и в глазу любое цветовое

ощущение получается в результате суммирования трех элементарных процессов, причем один из этих процессов должен в наибольшей степени возбуждаться красным светом, другой зеленым, а третий сине-фиолетовым. При любом ощущении цвета имеются все три процесса, и при переходе от одного цвета к другому меняются лишь относительно интенсивности их. Вследствие этого один основной процесс, взятый изолированно, вызывает ощущение, которое среди реальных цветов не встречается. Эта теория, выставленная Т. Юнгом, была развита, главным образом, Гельмгольцем.

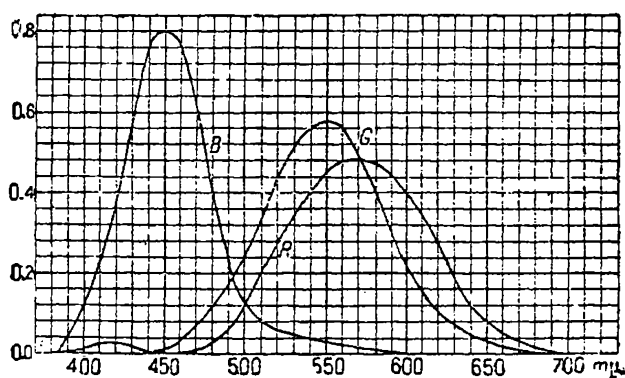


Рис. 3.

Существенную поддержку имеет она в наблюдениях, сделанных над частично цветнослепыми. Все случаи аномалий в цветном зрении, слепота на красный цвет — дальтонизм, зеленый или фиолетовый совершенно естественно объясняются полным падением одного из трех основных процессов. Из цветовых уравнений цветнослепых можно найти цвета, соответствующие основным процессам в глазу, так называемые «истинные основные цвета», и определить их координаты по отношению к трем реальным спектральным цветам (крайний красный, крайний фиолетовый и средний спектральный зеленый). После этого можно, очевидно, и обратно координаты всех данных нам цветов перечислить на «истинные основные цвета». Единицы, в которых должны быть измерены основные цвета, устанавливаются при этом произвольно так, чтобы все три координаты для белого света были равны между собою.

До настоящего времени мы имеем лишь одну серию кривых «основных ощущений» — это вышеприведенные кривые Кенига

и Айвса, полученные Кенигом экспериментально в 1893 г. В Америке для цветовых расчетов пользуются кривыми смещения, в которых за основные цвета приняты крайний спектральный красный, крайний спектральный фиолетовый и зеленый, соответствующий $\lambda = 503$ $m\mu$, но более, чем в спектре, насыщенный. Кривые эти были построены Уивером на основании экспериментальных данных Кенига, Дитеричи и Эбнея, без каких-либо новых измерений.

На рис. 3 и в табл. 1 даны отнесенные к «истинным основным цветам» кениг-айвсовские координаты нормального солнечного спектра (по оси абсцисс отложены длины волн λ , по оси ординат координаты, соответствующие различным цветам спектра). Форма трех кривых, — их называют «кривыми основных ощущений», — характерна для солнечного спектра и зависит от распределения энергии в нем. Площади трех кривых представляют, очевидно, общее раздражение неразложенным солнечным светом и должны, согласно вышеуказанному условию выбора единиц для основных цветов, быть равны между собою.

Главное преимущество нереальных основных цветов в том, что все перечисленные на них координаты цвета всегда являются положительными. При пользовании же основными цветами в случае насыщенных цветов мы можем встретиться с отрицательными координатами. При помощи кривых основных ощущений можно легко найти координаты любого окрашенного света, если известен его физический состав по сравнению с белым солнечным светом.

Если физический состав некоторого окрашенного света есть некоторая функция $\rho(\lambda)$, то нам нужно лишь помножить значения $\rho(\lambda)$ через равные промежутки $\Delta\lambda$ (положим, через 10 $m\mu$) на соответствующие ординаты кривых трех основных ощущений. Площади, заключенные между этими новыми кривыми и осью абсцисс, будут тогда пропорциональны координатам нашего цвета. Любой цвет, следовательно, может быть совершенно однозначно определен соответствующими ему тремя координатами.

Для определения тона цвета и его насыщенности достаточно, как сказано выше, указания *отношения* соответствующих ему основных ощущений, т. е. лишь двух независимых величин, поскольку мы отвлекаемся от третьей координаты цвета — его яркости, или светлоты. Геометрически можно поэтому изображать цвета при помощи прямоугольной системы координат как точки на плоскости, откладывая по оси ординат значения $r = \frac{x_1}{x_1 + x_2 + x_3}$,

а по оси абсцисс $g = \frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3}$, или g по оси абсцисс, а по оси ординат b .

Равноэнергетический спектр				Спектр «белого» света (5000°)		
λ	x	y	z	x	y	z
380	0,000		0,000	0,000		0,000
390	0,0045		0,0757	0,0029		0,0485
400	0,0107		0,186	0,0073		0,127
410	0,0163		0,319	0,0118		0,230
420	0,0190		0,482	0,0144		0,365
430	0,0148	0,000	0,743	0,0117	0,000	0,588
440	0,079	0,0048	0,929	0,0065	0,0039	0,763
450	0,000	0,0174	0,949	0,0000	0,0147	0,803
460	0,001	0,0380	0,867	0,0009	0,0319	0,756
470	0,0101	0,0670	0,705	0,0090	0,0598	0,630
480	0,0222	0,109	0,461	0,0203	0,100	0,421
490	0,0617	0,165	0,233	0,0575	0,154	0,217
500	0,123	0,244	0,123	0,117	0,231	0,117
510	0,199	0,346	0,0307	0,191	0,334	0,0778
520	0,275	0,453	0,0534	0,268	0,442	0,0521
530	0,340	0,525	0,0366	0,335	0,518	0,0361
540	0,399	0,569	0,0285	0,396	0,564	0,0282
550	0,441	0,577	0,0216	0,440	0,576	0,0216
560	0,466	0,554	0,0167	0,466	0,555	0,0168
570	0,470	0,494	0,0137	0,472	0,496	0,0138
580	0,462	0,394	0,0105	0,464	0,396	0,0105
590	0,438	0,287	0,0051	0,440	0,288	0,0051
600	0,398	0,198	0,0024	0,399	0,199	0,0024
610	0,348	0,100	0,0009	0,349	0,133	0,0009
620	0,280	0,0923	0,0002	0,288	0,0921	0,0005
630	0,214	0,0555	0,0000	0,212	0,0551	0,0002
650	0,0957	0,0184		0,0934	0,0180	
660	0,0580	0,0100		0,0561	0,0097	
670	0,0344	0,0054		0,0330	0,0052	
680	0,0148	0,0023		0,0140	0,0022	
690	0,0036	0,0014		0,0090	0,0013	
700	0,0052	0,0007		0,0048	0,0007	

Нередко встречается другой, для практики менее удобный, способ изображения, в котором величины основных ощущений x_1 , x_2 и x_3 рассматривают как грузы, приложенные в вершинах равностороннего треугольника RGB (рис. 4), и находят их центр тяжести, который при $x_1 = x_2 = x_3$ (белый цвет) проходит через центр треугольника.

Если длину стороны треугольника мы обозначим через l , то координаты центра тяжести грузов x_1 , x_2 и x_3 определяются из формулы:

$$\xi = \frac{1}{2} l \frac{x_2 \sqrt{3}}{x_1 + x_2 + x_3}, \quad \eta = \frac{1}{2} l \frac{x_2 + 2x_3}{x_1 + x_2 + x_3},$$

где ξ дает ординату, а η — абсциссу точки, соответствующей данному цвету.

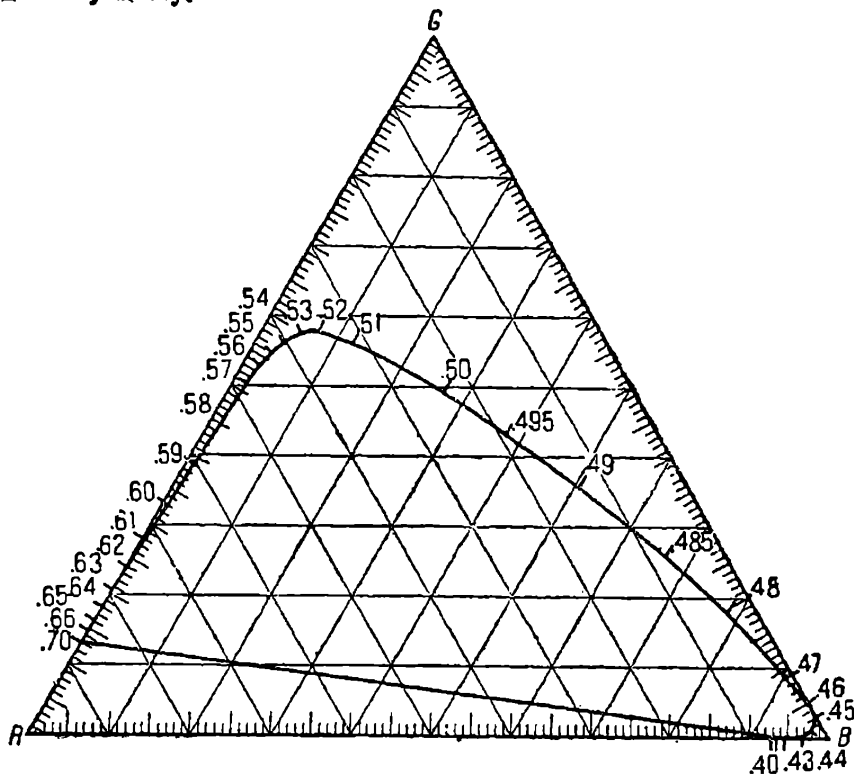


Рис. 4.

Положение спектральных цветов в таком цветовом треугольнике изображено на рис. 4, причем значения x_1 , x_2 и x_3 взяты из кривых Кенига с поправками Айвса. На этом же треугольнике нанесена сетка трилинейных координат, позволяющая определять x_1 , x_2 и x_3 и без посредства декартовых координат ξ и η . Для этого нужно лишь вместо x_1 , x_2 и x_3 взять относительные величины

$$r = \frac{x_1}{x_1 + x_2 + x_3}, \quad g = \frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3} \quad \text{и} \quad b = \frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3},$$

называемые *трехцветными коэффициентами*, причем, очевидно,

$$r + b + g = 1.$$

Тогда, откладывая r по стороне GR в направлении, указанном стрелкой, g по стороне BG и b по стороне RB и проводя линии, параллельные, соответственно, сторонам треугольника GB , RB и GR , мы найдем искомый цвет на пересечении этих линий.

В последние годы появилось исследование Райта, который заново в более совершенных условиях определил кривые смещения трех спектральных цветов: $R = 650 \text{ м}\mu$, $G = 530 \text{ м}\mu$, $B = 460 \text{ м}\mu$.

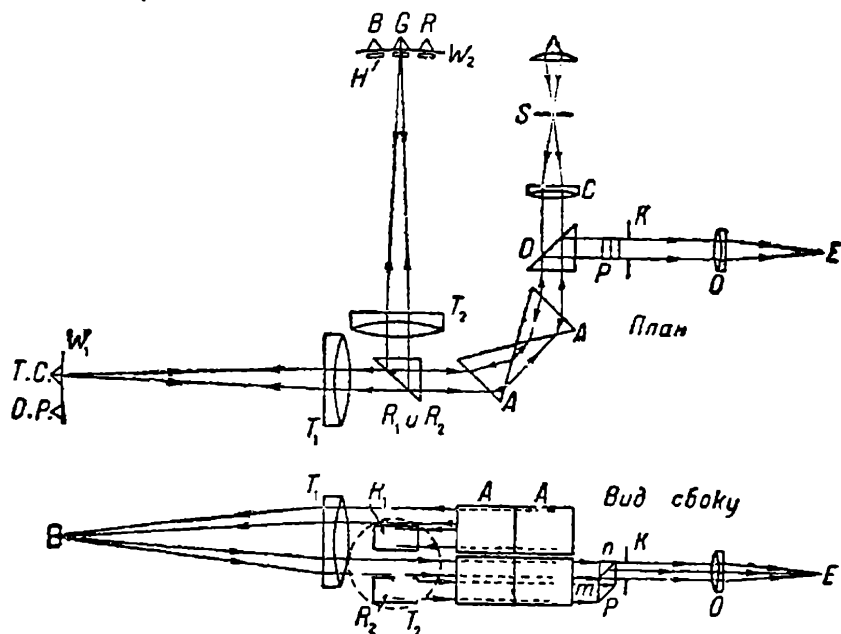


Рис. 5.

Очень тщательно продуманная экспериментальная установка его сводится к следующему (см. рис. 5, дающий схему этой установки при рассматривании ее сверху и сбоку). Щель S освещается светом от точечной лампы, фокусируемым на ней конденсором; выходящий из нее пучок света делается параллельным коллиматорной линзой C . Параллельный пучок проходит над прямоугольной призмой D и попадает на две призмы AA , разлагающие его на цвета. Верхняя половина пучка проходит затем через объектив T_1 и образует в фокусе его W_1 спектр. Нижняя