

С.О. Майзель

Свет и зрение

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 631
ББК 4
С11

С11 **С.О. Майзель**
Свет и зрение / С.О. Майзель – М.: Книга по Требованию, 2023. – 124 с.

ISBN 978-5-458-24638-5

Предлагаемая книга - не учебник, с одной стороны, и не монография, претендующая охватить тему полностью, с другой. Цель ее - изложить самые основные вопросы света и зрения, знание которых необходимо всякому светотехнику не вдаваясь в детализацию.

ISBN 978-5-458-24638-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

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.

I. ОСНОВНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

1. ВВЕДЕНИЕ.

Учение о свете обладает несколько особым характером среди прочих отделов знания. В нем физика, физиология и психология тесно соприкасаются между собою и отчасти даже оспаривают друг у друга области своего влияния. Довольно долгое время изучением свойств света занимались почти исключительно физики; казалось даже, что физика может без посторонней помощи разрешить все вопросы, касающиеся света, не обращая особого внимания на физиологическую и психологическую стороны учения о световых явлениях.

В физике имеется не мало отделов, разбирающих такие явления, которые не производят никакого, или почти никакого, действия на органы чувств. Например, электрические и магнитные явления характерны в том отношении, что они физиологически непосредственно не воспринимаются.

Имеет ли изолированное тело заряд (если потенциал его не чрезмерно высок), идет ли по проводнику электрический ток, намагничен ли стальной стержень, — всего этого непосредственно ни зрением, ни слухом, ни осязанием или обонянием узнать нельзя. Для установления всех этих обстоятельств требуются особые, более или менее сложные приборы, действия которых заменяют непосредственные указания органов чувств.

В отделе тепловых явлений только первоначальное, грубое осязательное ощущение тепла и холода связывает физику с физиологией. При первых же шагах в исследовании теплоты пришлось оставить ненадежное свидетельство осязания, как метод исследования, и обратиться к содействию вспомогательных приборов, способных дать точные сведения о количественной стороне явлений. Дальнейшее развитие познания тепловых явлений было уже целиком основано на изучении показаний этих приборов при тепловых процессах, и физиология перестала играть какую бы то ни было роль в физическом учении о теплоте.

Несравненно теснее связана физическая сторона явлений и физиологическое ощущение в учении о звуке. Конечно, и здесь физическая сторона звука может подвергаться изучению без участия

слуха, помощью одних только соответственных приборов. Однако физически звук представляет собою лишь колебательное движение частиц звучащего тела или передающей среды, понятие же о звуке зарождается в ухе и оформляется в мозгу, а потому отделить в учении о звуке физическую сторону от психо-физиологической оказывается затруднительным.

Глухой от рождения человек не может получить представления о том, что такое звук, но может воспринять осязанием и зрением колебательное движение звучащего тела, может усвоить все характерные признаки звука: высоту, длительность и тембр, может изучать распространение звуковых волн, их отражение и преломление. Вся физическая сторона учения о звуке будет вполне доступна такому человеку, и все же чего-то, самого основного, не будет хватать в его представлении. Идеи о созвучии и диссонансе, гармония, вся музыкальная область звука будут для него в лучшем случае сухими математическими соотношениями, ничего не говорящими его воображению, не создающими тех ощущений, какие воспринимаются людьми со здоровым слухом.

Еще в гораздо большей степени то же самое можно сказать о свете.

Тот факт, что свет, как своеобразный вид потока лучистой энергии, существует только для глаза — своеобразного приемника лучистой энергии, не может не быть принят во внимание физиками. Особенности приемника не могут ничего изменить в физической сущности излучения, но исключительная важность специфического приемника — глаза — для человека дает основание для учета физикой этих особенностей и для образования новых понятий, выделяющих определенный узкий участок обширного спектра электромагнитных колебаний из числа всех остальных, физически ему равноправных. Основой для выделения служат именно особенности приемника, а они определяются анатомическим строением глаза, физиологическими его свойствами и характером восприятия раздражений как с количественной, так и с качественной стороны.

Это несколько необычный прием для физики, которая, наоборот, всегда стремится отвлечься от случайных особенностей тех или иных приемников, приборов и специфических условий эксперимента и установить объективные законы явлений, вследствие чего в течение довольно долгого времени существовала неясность в понятиях, связанных со светом, и сложность психо-физиологических свойств зрения, и непостоянство их для отдельных людей вносили известную неопределенность в световые понятия и величины, и все это заставляло физиков относиться скептически к фотометрии.

Постепенно однако положение прояснилось. Оказалось возможным настолько разобраться в свойствах приемника света — глаза, чтобы выразить точно, в числовых величинах, эти свойства для

некоторого типичного приемника — среднего глаза. Мало того, оказалось вполне возможным хотя бы принципиально осуществить физический приемник, обладающий такой же реакцией на падающую лучистую мощность как глаз. С этого времени стало возможным дать чисто физическое определение всем световым понятиям и величинам, связать единицы измерения с общей системой физических единиц.

Физиологические свойства глаза являются только основой для построения схемы физического приемника лучистой мощности, налагающего особые условия на вводимые величины.

Таким образом создано твердое физическое основание для понимания и учета световых явлений.

В остальном, в новой отрасли техники — светотехнике — психофизиология продолжает играть существенную роль, поскольку естественный и искусственный свет служит глазу для различения предметов окружающего мира. Знание психофизиологических особенностей зрения совершенно необходимо для правильного использования света в задачах освещения, так как иначе решение этих задач получилось бы совершенно неудовлетворительным.

В дальнейшем изложении сделана попытка дать очерк основных понятий света, с одной стороны, и особенностей зрения, лежащих в основании светотехники, — с другой.

2. ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ.

Если какое-либо тело обладает температурой, превышающей среднюю величину ее в окружающих телах, то неизбежно происходит процесс выравнивания температуры, в результате которого во всех телах данной совокупности окажется одна и та же средняя температура. Этот процесс выравнивания может совершаться при помощи теплопроводности, когда тела непосредственно соприкасаются, или же путем лучеиспускания: избыток энергии данного тела передается в виде электромагнитных волн через пространство, разделяющее тела системы.

Смотря по условиям, в которых находится данное тело, периоды колебаний электромагнитных волн, им излучаемых, могут быть весьма различными. Изученные и применяемые в физике и технике периоды колебаний охватывают область от нескольких сотых долей секунд до припл. $2 \cdot 10^{-20}$ сек. В зависимости от периода электромагнитным волнам дают различные названия. Так волны с периодами от припл. 10^{-4} до 10^{-11} называются электрическими или герцевскими волнами, от 10^{-12} до $2,5 \cdot 10^{-15}$ — инфракрасными, от $2,5 \cdot 10^{-5}$ до $1,3 \cdot 10^{-15}$ — световыми, от $1,3 \cdot 10^{-15}$ до $6 \cdot 10^{-17}$ — ультрафиолетовыми и от $4 \cdot 10^{-18}$ до $2 \cdot 10^{-20}$ — рентгеновскими.

Световые ощущения производятся волнами, периоды которых лежат в крайне узких пределах — от 1,3 до $2,5 \cdot 10^{-15}$ сек. Вводя понятие об октавах, т. е. о промежутках (интервалах), разделяющих два колебания, период одного из которых в два раза больше или меньше периода другого колебания, можно составить себе наглядное представление о малом размере области световых колебаний по сравнению со всем диапазоном электромагнитных волн, который рассматривается в физике. Если принять за основное колебание то, у которого период равен 1 сек., то октава его имеет период 0,5 сек., вторая октава — 0,25 сек., третья октава — 0,125 сек. и

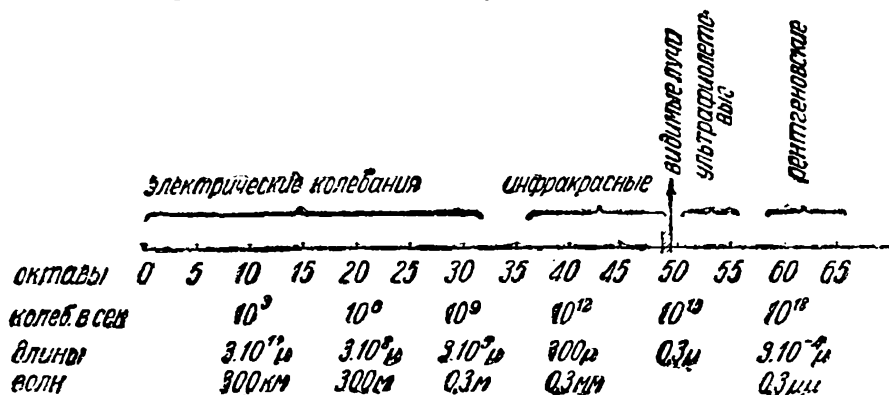


Рис. 1.

т. д. Десятая октава имеет период $\frac{1}{1024}$ сек. Делая заведомую ошибку в 2,4%, можно принять период десятой октавы за $\frac{1}{1000} = 10^{-3}$ сек.

Такое отступление от истины не изменит общего характера соотношений, а расчеты будут проще.

Тогда 20-я октава должна иметь период 10^{-6} сек. тридцатая — 10^{-9} , сороковая — 10^{-12} , пятидесятая — 10^{-15} , шестидесятая — 10^{-18} и семидесятая — 10^{-21} сек. Вся область электромагнитных волн (начиная от периода 1 сек.) представит приibl. 64 октавы, из которых на долю световых колебаний придется всего около одной октавы.

Откладывая вдоль некоторой прямой (рис. 1) в любом масштабе длины октав, т. е. строя логарифмическую шкалу чисел, обратных периодам, можно получить довольно наглядную картину соотношений в электромагнитных колебаниях, из которой видно, насколько ничтожна область световых колебаний по сравнению со

всей обширной областью изучаемых электромагнитных волн. Все, что лежит вне узкой заштрихованной области (рис. 1), не оказывает никакого действия на глаз, не воспринимается в качестве света. Внутри же этого ничтожного участка лежит область изменяющихся в сравнительно узких пределах периодов, воспринимаемых глазом качественно и количественно чрезвычайно разнообразно в виде света многообразных цветов. Только эта область колебаний представляется существенной для зрения. Колебания как световые, так и вообще электромагнитные характеризуются периодом T или обратной ему величиною $\nu = \frac{1}{T}$. Чаше же всего вместо

периода дают длину волны (λ) колебаний, которая связана с любой из упомянутых величин и со скоростью (c) распространения электромагнитных волн. Именно $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$. Скорость распространения

электромагнитных волн в пустоте не зависит от периода и равна $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек. В материальных же средах c представляет функцию λ . Обыкновенно длины волн относятся к пустоте.

Легко убедиться, что длины волн световых колебаний заключены в пределах приблизительно 0,4 μ ($\mu = 0,001$ мм) и 0,75 μ . Первый предел соответствует фиолетовому концу спектра, а второй — красному. Оба предела не могут быть даны точно и бывают для разных глаз различными, так что колебания, которые для одного глаза еще представляются „светом“, для другого светом не будут.

3. ЗАКОНЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Свет может быть получен разнообразными способами; однако пока наиболее часто встречаемым на практике, хотя далеко не самым экономичным, приходится считать нагревание тела (которое должно давать свет) до высокой температуры порядка 1500—2500° С и выше. Огромное большинство применяемых для освещения источников света излучает его благодаря высокой температуре.

Вследствие уже этого одного обстоятельства на свойства и законы температурного излучения было обращено особенно много внимания, и законы, управляющие им, по крайней мере для определенных случаев, изучены достаточно точно. К сожалению, даже для температурного излучения не удастся пока найти точных законов, пригодных для произвольного излучающего тела, и приходится ограничиваться знанием их только для определенного класса так называемых „черных“ тел и некоторых других, похожих в известных отношениях на черные.

При температурном излучении газы и пары, с одной стороны, и твердые и жидкие тела, с другой, ведут себя в общем различно. Газы излучают волны некоторого (иногда очень большого) числа

определенных периодов колебаний или, вернее, групп колебаний, периоды которых заключены в более или менее узких пределах. При разложении излучаемого ими света призмой получаются спектры, состоящие из ряда отдельных „линчй“ (вернее узких полосок) или более или менее широких полос.

Твердые и жидкие тела излучают колебания, периоды которых меняются непрерывно в очень широких пределах, спектр их непрерывен.

Спектральные линии газов нельзя считать за геометрические линии и следовательно нельзя приписать им одну определенную длину волны. Эти линии всегда представляют некоторую, хотя бы и очень малую, ширину, т. е. являются как бы очень узким куском сплошного спектра, на котором длина волны непрерывно меняется в весьма правда небольших пределах. С этой точки зрения, выделив из спектра газа излучение, соответствующее одной спектральной линии, или очень узкую полосу сплошного спектра, нельзя получить вполне однородного (мономатического) света. Все же обычно принято излучение, соответствующее одной спектральной линии или очень узкому участку непрерывного спектра, называть однородным в условном смысле.

Очевидно, в каждом таком, принимаемом условно за однородный, участке спектра излучается непрерывно некоторая энергия. Чем шире соответственный участок спектра, тем, при прочих равных условиях, за данное время в нем будет излучено больше энергии, и если края участка соответствуют длинам волн λ_1 и λ_2 , а разность их $\lambda_1 - \lambda_2 = d\lambda$ — очень малая величина, то можно положить количество излучаемой во всех направлениях энергии за малый промежуток времени dt пропорциональным $d\lambda$ и dt , т. е.

$$d^2w_{\lambda,T} = I_{\lambda,T} d\lambda dt.$$

Здесь $I_{\lambda,T}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий излучение. Если изменится температура T излучающего тела, то изменится и $I_{\lambda,T}$; точно так же, если взять другой участок спектра с другой характерной длиной волны (за длину волны очень узкого участка спектра можно принять среднюю величину между двумя краевыми, которые должны быть так близки друг к другу, чтобы разность между ними почти ускользала от измерения), — то опять-таки коэффициент $I_{\lambda,T}$ получит новое значение. Поэтому можно положить:

$$I_{\lambda,T} = f(\lambda, T).$$

Величина $d^2w_{\lambda,T}$ представляет очень малую энергию, излучаемую в малый промежуток времени dt в данном направлении. Разделив $d^2w_{\lambda,T}$ на dt , можно получить новую величину $dP_{\lambda,T} = \frac{d^2w_{\lambda,T}}{dt}$, ха-

рактизирующую излучаемую в единицу времени во всех направлениях энергию и приходящуюся на весьма узкий участок спектра $d\lambda$. Эту величину можно назвать *потоком лучистой энергии*:

$$dP_{\lambda,T} = I_{\lambda,T} d\lambda = f(\lambda, T) d\lambda.$$

Обыкновенно для упрощения принимается, что $dP_{\lambda,T}$ не зависит от времени, т. е. что при постоянной температуре энергия излучается равномерно во времени.

Для каждого вещества вид функции $f(\lambda, T)$ свой особый, характеризующий его своеобразное излучение. Если, наоборот, данное тело не излучает, а на него извне падает некоторый поток энергии определенной длины волны (в вышеуказанном смысле однородное излучение), то часть этого потока поглощается телом, остальная же проходит сквозь него или отражается. Отношение поглощенного потока однородного излучения dP' ко всему падающему dP пусть будет $A_{\lambda,T}$:

$$A_{\lambda,T} = \frac{dP'}{dP}.$$

Величина $A_{\lambda,T}$ является также функцией длины волны λ и температуры T поглощающего тела:

$$A_{\lambda,T} = \varphi(\lambda, T),$$

вид которой для разных тел различен. Очевидно $A_{\lambda,T}$ может приобретать наибольшее значение, равное единице, когда $dP' = dP$. Кирхгоф (Kirchhoff) впервые установил понятие о таком теле, у которого для всех возможных длин волны, температур и всех направлений падения потока величина $A_{\lambda,T} = 1$, т. е. о теле, поглощающем нацело при всякой температуре любое падающее на него однородное излучение. Если на какое-либо тело падает свет и целиком в нем поглощается, не отражаясь и не проходя сквозь него, то такое тело называется обыкновенно черным. Тело Кирхгофа обладает тем же признаком „черноты“ в несравненно более широком смысле: оно „черно“ не только для узкой области световых колебаний, но и для всего ряда электромагнитных волн. Естественно называть его поэтому „абсолютно черным“; обыкновенно его сокращенно называют „черным телом“. Величины $I_{\lambda,T}$ и $A_{\lambda,T}$ связаны между собой для различных тел общим простым законом, установленным также Кирхгофом. Имено, если обозначить I' , I'' , I''' и т. д. значения $I_{\lambda,T}$ для одного, другого, третьего и т. д. тела, точно так же A' , A'' , A''' ... — соответственные значения $A_{\lambda,T}$ для тех же тел, то:

$$\frac{I'}{A'} = \frac{I''}{A''} = \frac{I'''}{A'''} = \dots = \frac{I^0}{1}$$

при одинаковых λ и T .

Последний член равенства относится к черному телу, у которого $A_{\lambda,T}=1$. Каким бы образом ни были осуществлены различные черные тела, для всех их величина I° представляет одну и ту же функцию λ и T , специального вида

$$I^\circ = F(\lambda, T),$$

так как для них знаменатели выражения закона Кирхгофа обращаются в единицу.

Задача определения вида этой функции представлялась чрезвычайно интересной, но и очень трудной. Ее удалось разрешить Планку (Planck), который вывел для $F(\lambda, T)$ следующую формулу:

$$F(\lambda, T) = I^\circ = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$$

здесь e — основание натуральных логарифмов, c_1 и c_2 — две постоянные величины, связанные со скоростью c распространения электромагнитных волн (скоростью света) и двумя „мировыми“ постоянными h и k , играющими большую роль в современной физике. Именно:

$$c_1 = 2\pi c^2 h; \quad c_2 = \frac{ch}{k}.$$

Величины c , h и k имеют следующие значения:

$$c = 3 \cdot 10^{10} \left(\frac{\text{см}}{\text{сек.}} \right); \quad k = 1,372 \cdot 10^{-16} \left(\frac{\text{эрг.}}{^\circ\text{C}} \right);$$

$$h = 6,547 \cdot 10^{-27} \left(\frac{\text{эрг.}}{\text{сек.}} \right).$$

Величины h и k играют чрезвычайно большую роль в современной физике. Первая из них (h) характеризует живую силу газовых молекул. Именно, средняя энергия одной молекулы любого одноатомного газа при абсолютной температуре T равна $u = \frac{3}{2} kT$. Постоянная h представляет собою элементарное количество действия (произведение энергии на время) и играет основную роль в так называемой теории квант.

Из указанных соотношений следует:

$$c_1 = 2\pi \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 \cdot 6,547 \cdot 10^{-27} = 37,0 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{эрг./см}^2}{\text{сек.}} \right);$$

$$c_2 = \frac{3 \cdot 10^{10} \cdot 6,547 \cdot 10^{-27}}{1,372 \cdot 10^{-16}} = 1,430 \text{ (см. } ^\circ\text{C)}.$$

¹⁾ Данная здесь величина c_1 относится к общему монохроматическому излучению черного тела во всех направлениях в пространстве, а не к одному только определенному.

Величина коэффициента c_2 определялась неоднократно из опыта, причем получались такие значения: 1,4300 (Мюллер), 1,4312 (Милликэн), 1,4350 (Коблещи). Следует отметить, что температура T в формуле Планка отсчитывается от абсолютного нуля.

Формула Планка имеет довольно сложный вид. Разлагая правую часть ее в ряд и ограничиваясь одним первым членом, можно получить более простую формулу, данную впервые Вином:

$$R = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}.$$

Эта формула достаточно точно выражает излучение с 1 см^2 черного тела в видимой части спектра и потому в этой области ее удобно применять вместо формулы Планка.

Дифференцированием формулы Планка или Вина можно убедиться, что R приобретает наибольшее значение при величинах λ и T , связанных условием:

$$\lambda_m T = 0,2894 \text{ (см. } ^\circ\text{C)}.$$

Здесь λ_m означает ту длину волны (в см), при которой R получает для заданной абсолютной температуры T максимальное значение. Соответствующее длине волны λ_m наибольшее значение R_{\max} получится, если вставить в закон Планка вместо λ величину $\frac{0,2894}{T}$. Именно:

$$R_{\max} = c_1 T^5 \frac{\left(e^{\frac{1,43}{0,2894}} - 1 \right)^{-1}}{(0,2894)^5} = 131,2 \cdot 10^{-6} T^5,$$

причем эта формула выражает общее максимальное излучение черного тела во всех направлениях в пространстве на каждый квадратный сантиметр излучающей площади.

Из последних двух формул видно, что максимум излучаемого потока по мере повышения температуры T чрезвычайно быстро увеличивается и вместе с тем перемещается от больших длин волны к малым. Увеличение R_{\max} идет настолько быстро, что при попытке изобразить графически вид функции $F(\lambda, T)$ для различных температур оказывается невозможным представить на одном чертеже и в одинаковом масштабе кривые для удаленных друг от друга значений T . Чтобы все же получить общую картину, характеризующую функцию $F(\lambda, T)$ при разных T , можно воспользоваться переменным масштабом, откладывая на оси абсцисс величины, пропорциональные длинам волны, а на оси ординат — логарифмы R (рис. 2). На получаемых кривых видно перемещение максимума из далеких инфракрасных частей спектра для темпе-

ратур приблизительно до 4000° в видимую часть спектра. При дальнейшем повышении температуры максимум проходит через видимый спектр и около 7000° выходит за его пределы в ультрафиолетовую область.

До приблизительно 600° в видимой части спектра излучение практически отсутствует, и только дальнейшее повышение температуры дает начало излучению сперва в красной части, а потом по-

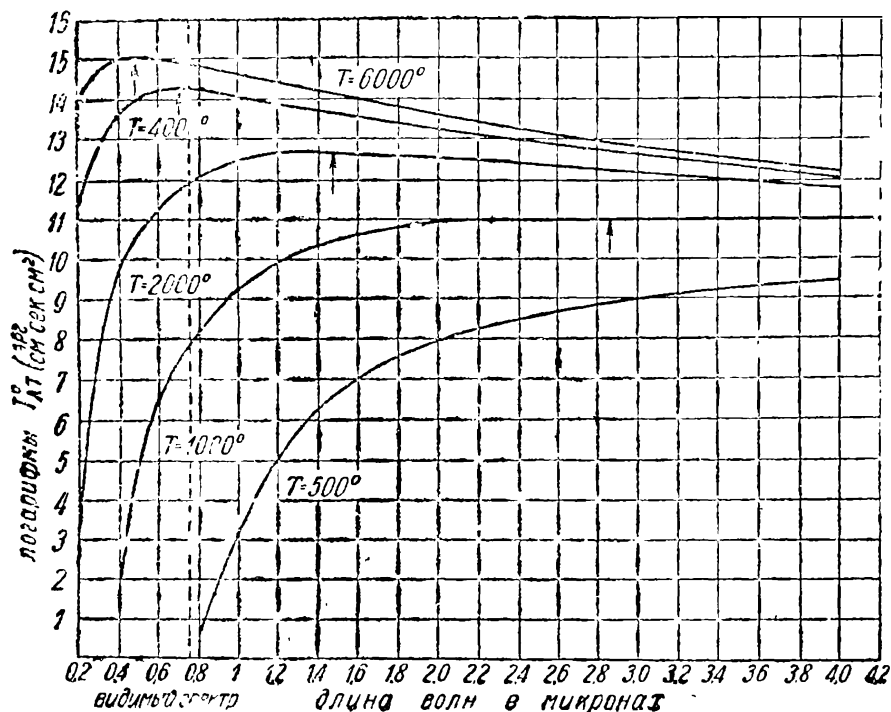


Рис. 2.

степенно и по всем остальным областям видимого спектра. Около $T = 1000^\circ$ уже $\log I$ для $\lambda = 0,4 \mu$ равен 2, а для $\lambda = 0,75 \mu$ — 8. Повышение температуры до 2000° увеличивает $\log I$ для фиолетового цвета почти на 8 единиц, а для красного — на 4, т. е. увеличение мощности для первого выражается почти в 100 000 000 раз, а для второго в 10 000 раз. По мере дальнейшего повышения температуры громадное в начале различие между фиолетовыми и красными излучениями все более сглаживается и около 4000° становится сравнительно малым, а уже при 6000° фиолетовые лучи оказываются интенсивнее красных.

К каждому бесконечно узкому участку спектра черного тела, на котором длина волны изменяется между заданной величиной λ