

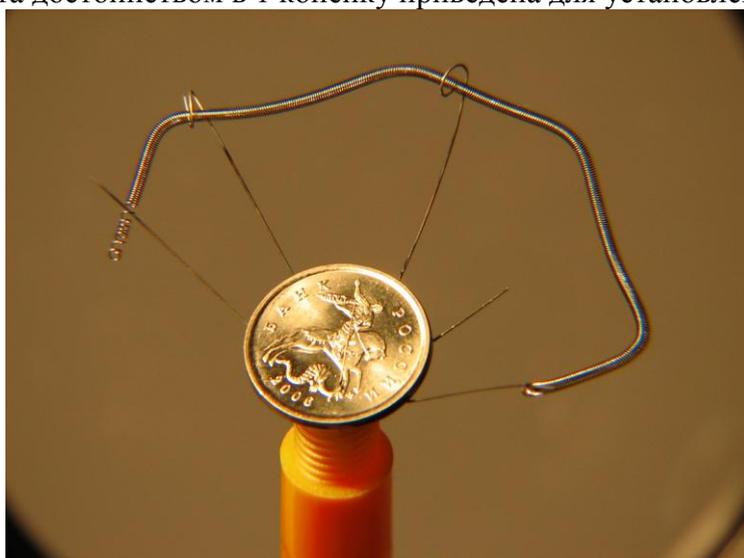
## Физика в лампе

«Светить всегда!  
Светить везде!  
До дней последних донца.  
Светить, и никаких гвоздей!»  
В.В. Маяковский

Изобретённые в 19 веке и усовершенствованные в 20 веке лампы накаливания и в нынешнем 21 веке продолжают служить людям. Эти лампы, как известно, являются «нелинейными элементами» электрических цепей и предназначены для того, чтобы светить. Светит нагретая до высокой температуры  $T$  твердая металлическая проволока (нить). Её нагрев осуществляется за счёт пропускания по ней электрического тока  $I$ . Цель статьи: познакомить читателей с физикой работы современных ламп с вольфрамовыми телами накаливания, и показать связь между напряжением электрической сети и сопротивлением лампы и световым потоком, который лампа производит.

### Самый тугоплавкий металл

Материал, из которого изготовлена проволока, – вольфрам – имеет среди всех чистых металлов самую высокую температуру плавления 3693 К, а кипит он при атмосферном давлении при температуре 5953 К. «Рабочей» считается температура вольфрамовой нити 2700 К – 3000 К. При температуре 3000 К давление насыщенных паров вольфрама составляет около  $10^{-4}$  Па. То есть он при такой температуре достаточно медленно испаряется<sup>1</sup>). Сечение проволоки, из которой изготовлена нить лампы накаливания, постепенно при работе лампы уменьшается, поэтому со временем параметры лампы «уходят» от своих первоначальных значений. Важнейшей характеристикой ламп накаливания является продолжительность срока их «службы» с сохранением в заданном диапазоне параметров лампы. Обычно срок службы устанавливается равным 3000 часов. При этом если лампа работает в сутки 8 часов, её календарный срок службы составит около года. Чем толще нить, тем при прочих равных условиях может быть выше её рабочая температура. На фотографии вольфрамовая спираль от разбитой лампочки 200 Ватт/220 В. Монета достоинством в 1 копейку приведена для установления масштаба.



<sup>1</sup> Для уменьшения скорости испарения вольфрама используют заполнение стеклянных баллонов ламп накаливания нейтральными газами (азотом, аргоном), давление которых в баллоне в рабочем режиме лампы составляет около 0,5 атм.

Тепловая энергия при прохождении тока по проволоке выделяется во всём её объёме, а покидает тепловая энергия спираль с внешней её поверхности, поэтому вблизи поверхности проволоки внутри спирали температура самая высокая.

При 1000°K коэффициент теплопроводности вольфрама равен 118 Вт/(м К). С ростом температуры этот коэффициент снижается обратно пропорционально температуре (примерно так же, как и электрическая проводимость металла). Пусть при 3000 К этот коэффициент равен  $\mu=40$  Вт/(м К).

Оценим разницу температур для внутренней и внешней части витка нити накала, которая изображена на фотографии. Зная размеры монеты, можно оценить диаметр спирали, в которую скручена проволока – он равен примерно  $D=0,9$  мм, а диаметр провода равен  $d=0,15$  мм. От начала спирали до её конца вдоль оси спирали примерно  $l=7$  см.

$$\Delta T \mu \frac{\pi D l}{d/2} \approx W / 2 = (200/2) = 100 \text{ Вт.}$$

Отсюда  $\Delta T \approx 0,7$ К. Эта разница температур пренебрежимо мала в сравнении с рабочей температурой 3000 К.

### **Электрическое сопротивление**

Электрическое сопротивление  $R=U/I$  нити накала зависит от температуры. В модельном рассмотрении можно принять, что сопротивление нити при температурах близких к рабочему значению (около 3000 К) прямо пропорционально абсолютной температуре  $T$ :

$$R_{(T)} = \frac{L \rho T}{\pi r^2 T_0} = R_0 \frac{T}{T_0} = \frac{U}{I}$$

Здесь  $\rho = 5 \times 10^{-8}$  (Ом×м) – это удельное сопротивление при характеристической температуре,  $T_0$  – характеристическая температура равная для вольфрама 383 К, и  $R_0$  – это и сопротивление нити при этой температуре.

### **Форма тела накаливания и излучение**

От формы накаливаемой нити зависит не только электрическое сопротивление нити, но и эффективная площадь, с которой от горячей нити уходит энергия в виде теплового излучения. Если форма нити – спираль, с близко расположенными витками, то эффективная площадь излучения примерно в два раза меньше площади поверхности нити. Применяют иногда и дважды скрученные спирально нити. В этом случае эффективная площадь излучения еще меньше. Можно ввести коэффициент  $\alpha$ , равный отношению эффективной площади излучения к полной площади поверхности нити накаливания. Эффективная площадь излучения равна:

$S_{эфф} = \alpha 2\pi r L$  Спираль при длине проволоки  $L$  имеет длину  $l$  в несколько раз меньшую  $L$ .

Это позволяет уменьшить размеры баллона лампы. Расстояние от нити лампы до стенки стеклянного баллона выбирается из соображений надёжной работы лампы. При малом расстоянии стекло сильно нагревается и может потерять жесткость (потечь). Стенки самых компактных ламп делают из чистого кварца, который сохраняет твердость до 2000 К.

Электрическая мощность  $W=U \times I$ , которую лампа накаливания в рабочем режиме получает от электрической сети, больше чем на 90% превращается в мощность излучения. Для модельных расчетов можно считать, что в излучение переходят все 100% электрической мощности. Излучение в данном случае – это главный механизм теплопередачи от горячей нити к холодной окружающей среде.

Для продолжения анализа работы лампы накаливания нужно напомнить читателям об основных физических законах, установленных для теплового излучения нагретых тел.

## Законы теплового излучения

Эмпирический закон, установленный на основе анализа экспериментальных результатов, гласит, что мощность теплового излучения тела пропорциональна площади излучающей поверхности  $S$ , 4-й степени абсолютной температуры поверхности тела  $T_1$ , и зависит от материала (вещества) тела (<sup>2</sup>). Это соотношение между величинами носит название: *закон Стефана – Больцмана*.

$$W = \beta S \sigma T_1^4$$

Коэффициент пропорциональности в приведенном соотношении служит постоянная Стефана – Больцмана:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4).$$

К – Кельвин. Коэффициент  $\beta$  – характеризует поверхность материала и называется коэффициентом «нечерноты». Для так называемого «абсолютно чёрного тела» он равен единице.

*Абсолютно чёрным* называют тело, которое поглощает все излучение, падающее на него.

Если окружение тела (среда) имеет температуру  $T_2$ , отличную от температуры тела, например, меньшую  $T_1$ , и обменивается теплотой с телом только посредством механизма излучения, то баланс процессов теплопередачи таков, что тело отдаёт энергию окружению, и мощность тепловых потерь тела вычисляется в соответствии с формулой:

$$\Delta W = \beta_1 S \sigma T_1^4 - \beta_2 S \sigma T_2^4$$

Здесь второе слагаемое в правой части соответствует поступлению теплоты к телу *от окружения*.

Рабочая температура нити накаливания во много раз превосходит температуру окружающей среды (порядка 300К), поэтому обратным потоком энергии (от среды к нити накала) можно пренебречь. Отсюда следует:

$$W = UI = S_{\text{эфф}} T^4 \sigma \beta = 2\pi a \beta \sigma r L T^4$$

При температуре 3000 К для вольфрама коэффициент  $\beta$  равен примерно 0,3. На рисунке, взятом из учебника Г.С. Ландсберга «Оптика», приведены спектральные плотности излучения вольфрама и абсолютно чёрного тела при температуре 2450 К в зависимости от длины волны излучения. Пунктирной линией показано отношение этих величин.

Как известно, есть и ещё один эмпирический закон, касающийся теплового излучения нагретых тел, – это закон Вина. Его утверждение: частота излучения, на которую приходится максимум плотности излучения, пропорциональна температуре тела.

Точную формулу для распределения по частотам плотности излучения абсолютно черного тела, имеющего температуру  $T$ , получил М. Планк:

$$E = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]} \sim \frac{\nu^3}{\left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]}$$

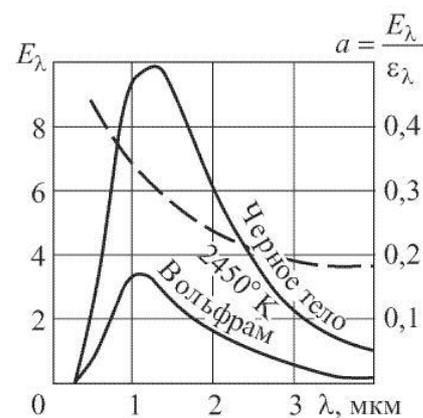


Рис. 36.7. Испускательная способность черного тела и вольфрама при температуре 2450 К

<sup>2</sup> Закон Стефана-Больцмана не объясняется классической физикой. Правильная интерпретация этого закона дается в квантовой механике. Постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma$  рассчитывается тоже методами квантовой механики. Она выражается через фундаментальные константы: постоянную Планка  $h$ , скорость света  $c$ , постоянную Больцмана  $k$ .

Здесь  $h$  – это постоянная Планка, равная  $6,6 \times 10^{-34}$  (Дж×с) Эта формула показывает, какая энергия излучается с единицы поверхности черного тела, находящегося при температуре  $T$  в тепловом равновесии с тепловым излучением в частотном диапазоне 1 Гц вблизи частоты  $\nu$ .

Из этой формулы следуют оба эмпирических закона теплового излучения: и закон Стефана-Больцмана, и закон Вина.

### **Рабочее напряжение, мощность и геометрические размеры спирали**

Если заданы материал нити – вольфрам, её рабочая температура  $T_{раб} = 3000$  К, и рабочее напряжение  $U_0 = 220$  В, то как обеспечить определённую рабочую мощность лампы накаливания  $W$ ? Можно подбирать длину нити  $L$ , её сечение  $\pi r^2$  (круг радиуса  $r$ ) и форму (спираль – одна из возможных форм).

$$W = \frac{U_0^2 T_0 \pi r^2}{\rho L T_{раб}} = 2\pi \alpha \beta \sigma r L T_{раб}^4$$

Из последнего равенства можно найти связь между длиной нити накаливания и радиусом её кругового сечения:

$$\frac{r}{L^2} = \frac{2\alpha\beta\sigma T_{раб}^5}{U_0^2 T_0} = \frac{const}{U_0^2}$$

Как видно из этого соотношения, чем больше рабочее напряжение лампы  $U_0$ , тем меньше должен быть радиус сечения проволоки  $r$  при заданной её длине  $L$ .

### **Ток через лампу зависит от напряжения**

Если к лампе подведено не рабочее напряжение, а напряжение меньшей или немного большей величины, как зависит от напряжения ток, протекающий по нити накаливания?

Ответить на этот вопрос легко. Для этого из уравнений для мощности лампы и для сопротивления нити следует исключить параметр температуру.

Получается, что для любой лампы накаливания ток зависит от напряжения (вблизи рабочего напряжения лампы) так:

$$I = I_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{\frac{3}{5}}$$

### **Световой поток и световая отдача**

Для характеристики светящейся лампы и света, получаемого от неё, мы в быту используем слова «яркая» или «тусклая» лампа и «много» или «мало» света она даёт.

Одна очень ярко светящаяся (белым калением) лампочка от карманного фонарика (мощностью 1 Вт) даёт в комнате «меньше света», чем одна тусклая (жёлтая) 40-ваттная лампочка, висящая под потолком. Если включить разом несколько 1-ваттных лампочек (15-20 шт), то можно получить такую же освещённость в комнате, как и от одной 40-ваттной лампочки. Получается, что одинаковая освещённость в комнате, оцениваемая по зрительному ощущению, получается при разных суммарных мощностях, получаемых лампами от источников тока.

Таблица, взятая из учебника Г.С. Ландсберга «Оптика», даёт представление о световой отдаче ламп накаливания разного типа при нормальном режиме горения. За меру световой отдачи принимают отношение полного светового потока, посылаемого лампой (в люменах), к полной мощности, затрачиваемой на питание лампы (в ваттах). Срок службы ламп — 1000 час.

### Данные о световой отдаче ламп разного типа

Тип лампы	Световая отдача, лм/Вт	КПД	Температура истинная, К	Температура цветовая, К	Яркость, $10^4$ кд/м <sup>2</sup>
50 Вт, пустотная угольная	2,5		2095	2130	около 50
50 Вт, пустотная вольфрамовая	10	1,6 %	2400	2505	150–200
50 Вт, газонаполненная вольфрамовая	10		2685	2670	около 500
500 Вт, то же	17,5	2 %	2900	2880	около 1000
2000 Вт, » »	21,2	3,5 %	3020	3000	1300–1500

Обычные современные лампы накаливания с мощностью в диапазоне  $W = 60 \div 200$  Вт, с рабочим напряжением  $U = 220$  В, с вольфрамовой нитью имеют световую отдачу 12 люмен/Ватт. Если лампа работает при низком напряжении электрической сети (<sup>3</sup>), то в этом случае толщина проволоки велика (в сравнении с нитями ламп, рассчитанных на ту же мощность, но с рабочим напряжением 220 В), и можно поднять рабочую температуру при сохранении срока службы лампы. При этом эффективность преобразования энергии вырастает до 20 люмен/Ватт. Максимально возможная световая отдача (порядка 600 люмен/Вт) могла бы быть достигнута при температуре светящегося тела 5200 К примерно такой же, как и температура поверхности Солнца. Однако материалов, которые бы при такой температуре оставались твёрдыми в природе не существует.

### Глаз человека и излучение

Наши глаза в наибольшей степени чувствительны к свету с длинами волн вблизи 550 нм, который попадает на Землю от Солнца. На краях видимого диапазона при длинах волн света около величин 760 нм и 400 нм чувствительность глаза человека к свету в тысячи раз меньше. Это означает, что для создания одинакового со светом 550 нм ощущения освещенности требуется в тысячи раз больший энергетический поток света с длинами волн 760 нм или 400 нм.

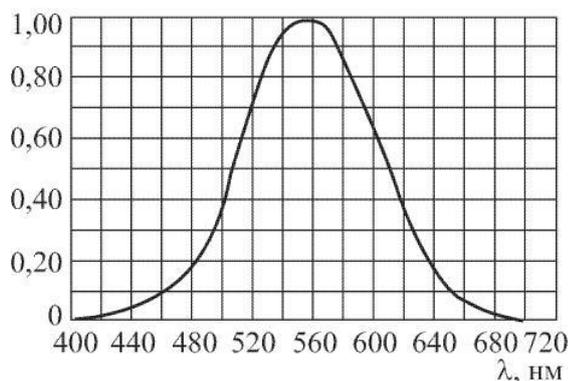


Рис. 3.5. Кривая видности

На рисунке (из того же учебника) приведена так называемая кривая «видности». На половине «высоты» видность соответствует длинам волн 510 нм и 610 нм.

Рабочая температура вольфрамовой нити накала примерно вдвое меньше, чем температура внешних слоёв Солнца (около 6000 К), от которых на Землю приходит свет. Поэтому в соответствии с законом Вина максимум плотности излучаемых горячей нитью электромагнитных волн приходится на невидимый глазами свет со средней длиной волны 1 мкм. В основном энергия от лампы накаливания уходит в виде инфракрасного

<sup>3</sup> Например, в системе освещения легковых автомобилей используется источник тока с напряжением 12 В.

излучения. Только небольшая часть распределения попадает в хорошо видимый глазу диапазон длин волн 510 нм – 610 нм, вследствие чего эффективность использования электрической энергии, которая расходуется на то, чтобы поддерживать температуру нити «рабочей», не очень высока. В видимый свет эквивалентный по действию на глаз свету с длиной волны 550 нм в лампе накаливания в рабочем режиме преобразуется всего около 1÷2% энергии.

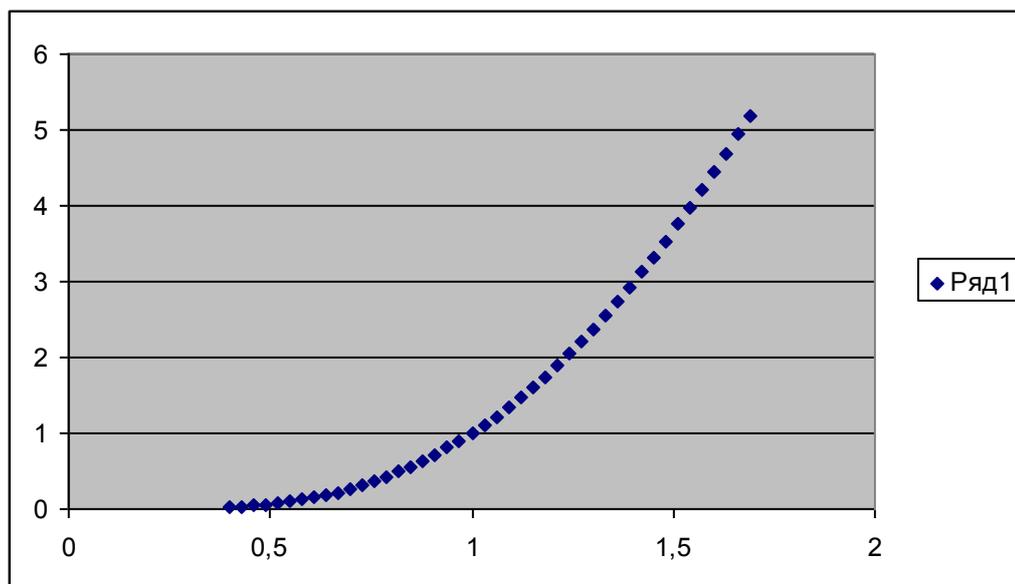
### **Как зависит световая мощность, излучаемая лампой накаливания в диапазоне 0,5-0,6 мкм, от напряжения на лампе?**

Если напряжение на лампе меньше рабочего значения, то температура спирали становится меньше рабочей, и эффективность преобразования электрической энергии в видимый свет становится меньше, чем в рабочем режиме. А при большем напряжении (в сравнении с рабочим значением) эффективность преобразования энергии в свет вырастает, правда, при этом сокращается гарантированный срок службы лампы.

Нас интересует мощность  $W_{0,55}$  лампы с рабочей температурой 3000 К только вблизи одной длины волны  $\lambda = 0,55$  мкм (ей соответствует частота  $\nu=c/\lambda$ ). Из приведённых в предыдущих разделах соотношений можно получить формулу, которая описывает зависимость интересующей нас мощности свечения лампы  $W_{0,55}$  от напряжения на ней:

$$T \sim \frac{U}{I} = T_{\text{раб}} \left( \frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{5}} \Rightarrow \frac{W_{0,55}}{W_{\text{раб}0,55}} = \frac{\left[ \exp \left( \frac{h\nu}{kT_{\text{раб}}} \right) - 1 \right]}{\left[ \exp \left( \frac{h\nu}{kT_{\text{раб}}} \left( \frac{U_0}{U} \right)^{\frac{2}{5}} \right) - 1 \right]} \approx \frac{6 \times 10^3}{\left[ \exp \left( 8.7 \left( \frac{U_0}{U} \right)^{\frac{2}{5}} \right) - 1 \right]}$$

Здесь  $W_{\text{раб}0,55}$  – это интересующая нас мощность, излучаемая лампой в рабочем режиме. На рисунке приведена рассчитанная в соответствии с полученной формулой зависимость отношения ( $W_{0,55}/W_{\text{раб}0,55}$ ) (вертикальная ось) от отношения ( $U/U_0$ ), которое варьируется от 0,4 до 1,69, (горизонтальная ось). При наибольшем значении этого отношения температура нити станет равной температуре плавления вольфрама, то есть примерно 3700 К.



Как видно, мощность  $W_{0,55}$  лампы может быть в 5 раз больше номинальной  $W_{\text{раб}0,55}$ , которая достигается при рабочей температуре лампы 3000 К. И при таком повышенном напряжении на лампе её раскалённая нить не сразу перегорает.

Если рабочая температура нити накала меньше 3000 К, а для многих типов ламп накаливания это именно так и есть, то при повышении напряжения на лампе свечение

лампы в видимом диапазоне может увеличиваться по сравнению с номинальным в десятки раз (правда, кратковременно:-).

Отмеченные зависимости вполне можно получить экспериментально и проверить, не нафантазировал ли автор. Оборудование для проверки потребует не сложное. Проще всего проверить зависимость тока через лампу от напряжения, для этого нужны амперметр, вольтметр и регулируемый источник тока. Для изучения зависимости мощности свечения лампы в видимом диапазоне от напряжения можно воспользоваться, например, люксметром и фильтром, выделяющим желтый цвет.

P.S. Вспомнил! Нужно же указать читателям направление исследований, которое не рассмотрено в статье. Есть такое! В статье никак не отражено, что напряжение в сети переменное. Поэтому, естественно, что и ток, и мощность свечения лампы в видимом диапазоне, и температура её нити накала зависят от времени. Можно воспользоваться генератором с регулируемой частотой и исследовать поведение разных лампочек в зависимости от частоты изменения напряжения. На мой взгляд, это прекрасная тема для школьного «научного» исследования.

Выводы: Даже в таком обычном объекте, как лампочка накаливания, оказывается, есть столько интересной физики, что невольно приходится согласиться с утверждением, что какую бы область исследований физик себе ни выбрал, всюду есть над чем работать, и открывать что-то новое для себя и для других.

С. Варламов

5 июня 2007 г.