

Физика вокруг нас



Варламов Сергей Дмитриевич
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики специализированного учебно-науного центра МГУ им. М.В. Ломоносова. Член жюри Московской городской и Всероссийской олимпиад школьников по физике.

Физика в лампе

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

Изобретённые в XIX в. и усовершенствованные в XX в. лампы накаливания и в нынешнем XXI веке продолжают служить людям. Они, как известно, являются «нелинейными элементами» электрических цепей и предназначены для освещения. Светит в них нагретая до высокой температуры металлическая проволока (нить). Её нагрев осуществляется электрическим током. Цель этой статьи: познакомить читателей с физикой работы современных ламп с вольфрамовыми нитями накаливания и показать связь между напряжением в электрической сети и сопротивлением лампы, а также световым потоком, который создаёт лампа.

Самый тугоплавкий металл

Материал, из которого изготавливают проволоку для нитей накаливания, – вольфрам имеет среди всех чистых металлов самую высокую температуру плавления, равную 3693 К, а кипит он при нормальном атмосферном давлении, когда температура достигает 5953 К. «Рабочей» считается температура вольфрамовой нити 2700-3000 К. При температуре 3000 К давление насыщенных паров вольфрама составляет около 10^{-4} Па. Поэтому скорость его испарения невелика [1]. Поскольку толщина нити при работе лампы постепенно уменьша-

[1] Для уменьшения скорости испарения вольфрама стеклянные баллоны ламп накаливания заполняют нейтральными газами (азотом, аргоном), давление которых в рабочем режиме лампы составляет около 0,5 атм. Эта мера обеспечивает бóльший возврат испарившихся молекул на горячую нить.

ется, её параметры со временем «уходят» от своих первоначальных значений.

Важнейшая характеристика ламп накаливания – продолжительность срока их службы при сохранении параметров лампы в заданном диапазоне. Обычно срок службы устанавливается равным 3000 ч. В этом случае, если лампа работает в сутки 8 ч., её календарный срок службы составит около года.

На рис. 1 показана вольфрамовая спираль от разбитой лампочки (200 Вт, 220 В). Монета достоинством в одну копейку приведена для установления масштаба. Чем толще нить, тем при прочих равных условиях может быть выше её рабочая температура.

Электрическое сопротивление вольфрамовой нити накала определённой длины зависит от её формы и температуры. В модельном рассмотрении можно принять, что оно при температурах, близких к рабочему значению (около 3000 К), прямо пропорционально абсолютной температуре T:

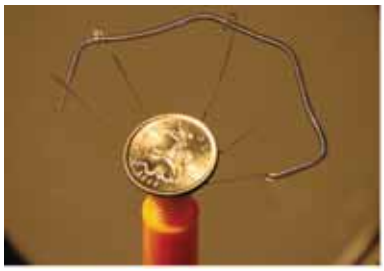


Рис. 1

$$R = R_0 \frac{T}{T_0}, \qquad (1)$$

где T_0 – характеристическая температура, для вольфрама она равна 383 К, R_0 – сопротивление нити при этой температуре. Выше характеристической температуры вплоть до температуры плавления металла эта зависимость хорошо соответствует экспериментальным данным.

Интересно, что сопротивление любой лампы накаливания с вольфрамовой нитью в «горячем» состоянии (лампа горит, $T \approx 3000$ К) больше, чем в «холодном» (лампа не горит, $T \approx 300$ К) в 10 и более раз. Оценка по формуле (1) подтверждает этот опытный факт.

Форма нити накаливания и излучение

От формы накаливаемой нити зависит не только её электрическое сопротивление, но и эффективная площадь, с которой от неё распространяется энергия в виде излучения. Если форма нити – спираль с близко расположенными витками, то эффективная площадь излучения примерно в 2 раза меньше площади поверхности нити. Если (что бывает иногда) применяют дважды скрученные спирально нити, то эффективная площадь излучения ещё меньше. Для её определения можно ввести коэффициент α, равный отношению эффективной площади излучения к полной площади поверхности нити накаливания. Тогда эффективная площадь излучающей поверхности будет равна:

$$S_{\text{эфф}} = \alpha 2\pi r L,$$

где L – длина проволоки, r – радиус её поперечного сечения.

Спираль из этой проволоки имеет длину l, в несколько раз меньшую L (это позволяет уменьшить размеры баллона лампы). Расстояние от нити до стеклянных стенок баллона выбирается из соображений надёжности, т.к. при малом расстоянии стекло сильно нагревается и может начать плавиться. Стенки самых компактных ламп делают из чистого кварца, который сохраняет твёрдость до 2000 К.

Электрическая энергия, которую лампа накаливания в рабочем режиме получает от электрической сети, почти вся превращается в энергию излучения. Для модельных расчётов можно считать, что в излучение переходят все 100% электрической энергии. Излучение в данном случае служит главным механизмом теплопередачи от горячей нити окружающей среде.

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

Законы теплового излучения

Закон, установленный на основе анализа экспериментальных результатов, гласит: мощность W теплового излучения тела пропорциональна площади излучающей поверхности S, абсолютной температуре поверхности тела T_1 в 4-й степени и зависит от его материала (вещества). Это соотношение между величинами называется *законом Стефана-Больцмана*:

$$W = \beta S \sigma T_1^4. \qquad (2)$$

Коэффициентом пропорциональности в приведённом соотношении служит σ – постоянная Стефана-Больцмана[1]:

$$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \ \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4).$$

Коэффициент β характеризует излучающую способность поверхности материала по сравнению с так называемым абсолютно чёрным телом и называется «коэффициентом черноты». *Абсолютно чёрным телом* называют тело, которое поглощает всё излучение, падающее на него. Для такого тела $\beta = 1$; для вольфрама $\beta = 0{,}3$ при температуре 3000 К.

Если окружение излучающего тела (среда) имеет температуру T_2, отличную от T_1 (например, $T_2 < T_1$), и обменивается с ним теплотой только посредством излучения, то баланс процессов теплопередачи таков, что тело отдаёт энергию среде, и мощность его тепловых потерь вычисляется по формуле:

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

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



Рабочая температура нити накаливания во много раз превосходит температуру окружающей среды, в том числе и температуру стенок стеклянного баллона лампы. Поэтому обратным потоком энергии (от среды к нити накала) можно пренебречь. Отсюда следует:

$$W = UI = S_{\text{эфф}} T^4 \sigma \beta = 2\pi\alpha\beta\sigma r L T^4. \qquad (3)$$

На рис. 2, взятом из учебника Г.С. Ланд-

[1] Закон Стефана-Больцмана не объясняется классической физикой. Правильная интерпретация этого закона даётся в квантовой механике. Постоянная Стефана-Больцмана σ рассчитывается тоже методами квантовой механики. Она выражается через фундаментальные константы: постоянную Планка h, скорость света c, постоянную Больцмана k.

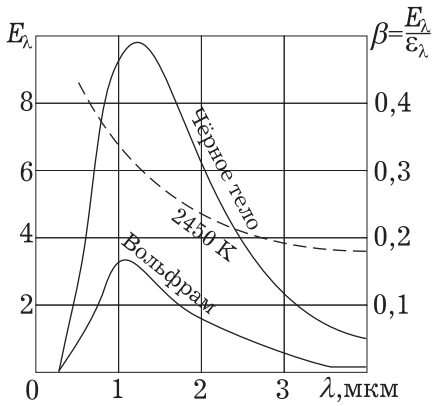


Рис. 2. Испускательная способность чёрного тела и вольфрама при температуре 2450 К

сберга «Оптика», приведены плотности энергии излучения вольфрама E_λ и абсолютно чёрного тела ε_λ при температуре 2450 К в зависимости от длины волны излучения. Пунктирной линией показано отношение этих величин, равное $\beta = E_\lambda / \varepsilon_\lambda$.

Ещё один закон теплового излучения нагретых тел – это *закон Вина*: длина волны λ_m, на которую приходится максимум испускательной способности тела, обратно пропорциональна его температуре. Соответствующая этому закону формула: $\lambda_m = \frac{b}{T}$, где b – постоянная Вина:

$$b = 0{,}2898 \text{ см} \cdot \text{градус}.$$

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

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

Здесь h – постоянная Планка, равная $6{,}6\cdot10^{-34}$ Дж$\cdot$с. Эта формула показывает, сколько энергии излучается единицей поверхности абсолютно чёрного тела, находящегося при температуре T в тепловом равновесии с излучением окружения, в частотном диапазоне 1 Гц вблизи частоты ν.

Рабочие напряжение, мощность и размеры спирали

Как обеспечить определённую рабочую мощность W лампы накаливания, если заданы материал нити – вольфрам, её рабочая температура $T_{\text{раб}} = 3000$ К и рабочее напряжение $U_0 = 220$ В? Можно подобрать длину нити L, её радиус и форму (спираль – одна из возможных форм). В этом случае, учитывая формулу (1) и соотношение $R_0 = \frac{\rho L}{\pi r^2}$, находим, что мощность электрического тока W в лампе равна

$$W = \frac{U_0^2}{R} = \frac{U_0^2 T_0 \pi r^2}{\rho L T_{\text{раб}}},$$

и получаем с учётом (3) равенство:

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

из которого следует связь между рабочим напряжением, длиной нити накаливания и радиусом её поперечного сечения:

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

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

Ток в лампе при напряжениях, отличных от рабочего

Как зависит от напряжения ток, протекающий по нити накаливания, если к лампе подведено не рабочее, а меньшее или немного большее напряжение? Ответить на этот вопрос легко. Мощность тока в лампе равна $\frac{U^2}{R}$. Вместе с тем эта же мощность в случае преобразования её в излучение будет пропорциональна T^4. Поскольку $R \sim T$, то $U \sim T^{\frac{5}{2}}$. По закону Ома сила тока $I = \frac{U}{R}$, следовательно,

$$I \sim T^{\frac{3}{2}}.$$

Исключая из полученных соотношений температуру, находим:

$$I = I_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{3}{5}}, \qquad (4)$$

где I_0 – сила тока при рабочем напряжении U_0. Так (соотношение (4)) связаны сила тока и напряжение (вблизи рабочей точки) в любой лампе накаливания.

Глаз человека и излучение

Глаза людей в наибольшей степени чувствительны к свету с длинами волн вблизи 550 нм. На краях видимого диапазона (при длинах волн света около 760 нм и 400 нм) их чувствительность в тысячи раз меньше. Это означает, что для создания в этом случае одинакового со светом длиной волны 550 нм ощущения освещённости («видности» тел) требуется в тысячи раз бóльший поток света.

На рис. 3 (из того же учебника) приведена так называемая кривая видности. На половине её «высоты» видность соответствует длинам волн 510 и 610 нм.

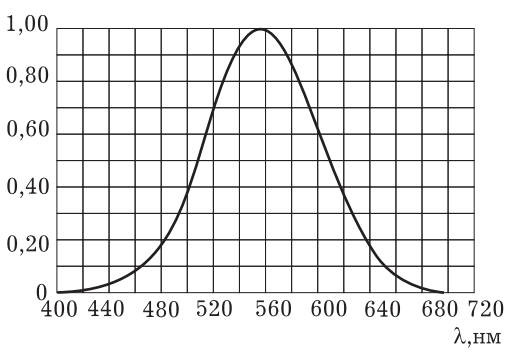


Рис. 3. Кривая видности

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 энергии излучаемых горячей нитью электромагнитных волн приходится на невидимый участок спектра со средней длиной волны 1 мкм. В основном энергия от лампы накаливания уходит в виде инфракрасного излучения, и только небольшая её часть попадает в видимый диапазон спектра, вследствие чего эффективность использования электрической энергии, которая расходуется на то, чтобы поддерживать температуру нити «рабочей», не очень высока. Если считать «полезной» энергию, излучаемую лампой в видимом диапазоне, а всю полученную электрическую энергию из электрической сети принять за 100%, то можно ввести понятие коэффициента полезного действия лампы (КПД). Так, в излучение, эквивалентное (по действию на глаз) свету с длиной волны 0,550 мкм, лампа накаливания

преобразует в рабочем режиме всего около 1-2% энергии. В зависимости от типа источника света и от мощности создаваемого им светового потока человеческий глаз воспринимает свет как свет определённого цветового оттенка – «белого», «жёлтого», голубоватого» и других. Это связано с распределением энергии по длинам волн. Каждому цветовому оттенку можно поставить в соответствие температуру теплового источника света (чёрного тела), создающего (по зрительному ощущению) свет примерно такого же цветового оттенка. Это так называемая «цветовая» температура источника света.

Световой поток и световая отдача

Для характеристики электролампы как источника света в быту используют слишком неопределённые слова «яркая» или «тусклая» лампа, «много» или «мало» она даёт света. Физика же даёт достаточно точные представления об интенсивности свечения. Рассмотрим, какие параметры используются для этого.

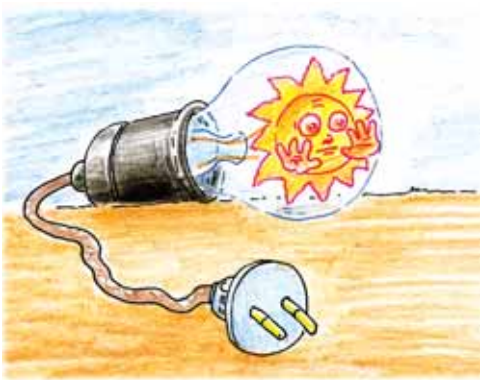
Одна очень ярко светящаяся при белом калении лампочка от карманного фонарика (мощность 1 Вт) даёт в комнате меньше света, чем одна тусклая (жёлтая) 40-ваттная лампочка, висящая под потолком. Если включить сразу несколько 1-ваттных лампочек (15-20 шт), то можно получить в комнате такую же освещённость, как и от одной 40-ваттной лампочки. Получается, что одинаковая освещённость в комнате (оцениваемая по зрительному ощущению) создаётся при разных суммарных мощностях ламп, обеспечиваемых источником тока.

Этот эффект обусловлен различием у ламп (разной мощности) такого параметра, как световая отдача. За меру световой отдачи принимают отношение полного светового потока, идущего от лампы (в люменах), к полной мощности тока, питающего лампу (в ваттах). В таблице (взята из учебника Г.С. Ландсберга «Оптика») дано представление о световой отдаче ламп накаливания разного типа при нормальном режиме горения. Срок их службы – 1000 ч.

Данные о световой отдаче ламп разного типа

Типы ламп	Световая отдача, лм/Вт	КПД	Температура истинная, К	Температура цветовая, К
50 Вт, пустотная угольная	2,5		2095	2130
50 Вт, пустотная вольфрамовая	10	1,6%	2400	2505
50 Вт, газонаполненная вольфрамовая	10		2685	2670
500 Вт, то же	17,5	2%	2900	2880
2000 Вт, то же	21,2	3,5%	3020	3000

Обычные современные лампы накаливания мощностью в диапазоне 60-200 Вт с рабочим напряжением U=220 В и вольфрамовой нитью имеют световую отдачу 12 лм/Вт. Если лампа работает при низком напряжении электрической сети (например, в системе освещения легковых автомобилей используется источник тока с напряжением 12 В), то её нить делается более толстой (при той же мощности). Благодаря этому, можно поднять рабочую температуру нити при сохранении срока службы лампы. В этом случае эффективность преобразования энергии возрастает до 20 лм/Вт. Максимально возможная световая отдача (порядка 600 лм/Вт) могла бы быть достигнута при температуре светящегося тела 5200 К – примерно такой же, как и температура поверхности Солнца. Однако материалов, которые при такой температуре оставались бы твёрдыми, в природе не существует.



Зависимость световой мощности лампы (в диапазоне 0,5-0,6 мкм) от напряжения

Если напряжение на лампе меньше рабочего значения, то температура её нити становится меньше рабочей и эффективность преобразования электрической энергии в энергию света уменьшается. А при напряжении, большем рабочего, эффективность этого преобразования возрастает (правда, при этом сокращается гарантированный срок службы лампы).

Найдём мощность свечения лампы при рабочей температуре 3000 К только вблизи одной («средней» в указанном диапазоне) длины волны $\lambda = 0{,}55$ мкм. Из приведённых в предыдущих разделах соотношений можно получить формулу, которая описывает зависимость этой мощности от напряжения на лампе:

$$T \sim \frac{U}{I} = T_{\text{раб}} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{2}{5}} \Rightarrow \frac{W_{0,55}}{W_{\text{раб}0,55}} =$$

$$= \frac{\left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{раб}}} \right) - 1 \right]}{\left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{раб}}} \left(\frac{U_0}{U} \right)^{\frac{2}{5}} \right) - 1 \right]} \approx$$

$$\approx \frac{6 \cdot 10^3}{\left[\exp\left(8{,}7 \left(\frac{U_0}{U} \right)^{\frac{2}{5}} \right) - 1 \right]}.$$

Здесь $W_{\text{раб}0,55}$ – это мощность излучения лампы в рабочем режиме.

На рис. 4 приведена рассчитанная в соответствии с полученной формулой зависимость отношения мощностей $\frac{W_{0,55}}{W_{\text{раб}0,55}}$ (вертикальная ось) от отношения напряжений $\frac{U}{U_0}$, которое

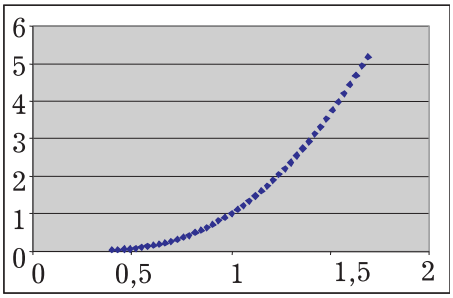


Рис. 4

варьируется от 0,4 до 1,69 (горизонтальная ось). При наибольшем значении этого отношения температура нити станет равной температуре плавления вольфрама, т.е. примерно 3700 К.

Как видно, мощность $W_{0,55}$ лампы может быть в 5 раз больше номинальной $W_{раб0,55}$. Но и при повышенном напряжении раскалённая нить лампы 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 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 этого потребуется несложное). Проще всего проверить зависимость тока, проходящего через лампу, от напряжения. Для этого нужны амперметр, вольтметр и регулируемый источник тока. Для исследования зависимости свечения лампы в видимом диапазоне от напряжения можно воспользоваться, например, люксметром и фильтром, выделяющим жёлтый цвет.

Вспомнил! Нужно же указать читателям направление исследований, которое не рассмотрено в статье. Есть такое. В статье нигде не отмечено, что напряжение в сети переменное. Поэтому, естественно, что и сила тока в лампе, и мощность свечения, и температура её нити зависят от частоты. Воспользовавшись генератором с регулируемой частотой, можно исследовать, как свечение разных ламп зависит от частоты изменения напряжения. На мой взгляд, это прекрасная тема для школьного «научного» исследования.



Вывод. Даже в таком обычном объекте, как лампочка накаливания, оказывается, есть столько «интересной физики», что невольно приходится согласиться с утверждением: в любой области исследований найдётся поле для работы и новых физических открытий для себя и других.