

Как мы видели, максимальным световым действием обладает излучение при длине волны  $\lambda=0,556 \text{ мк}$ . Если бы излучение какого-либо источника было целиком сосредоточено в этом участке спектра, мы считали бы коэффициент полезного действия этого излучения равным единице. При этом световая отдача излучения, т. е. число люменов светового потока на каждый ватт излучаемой мощности, имела бы максимальное значение, равное  $620 \text{ лм/вт}$ . Для вся-

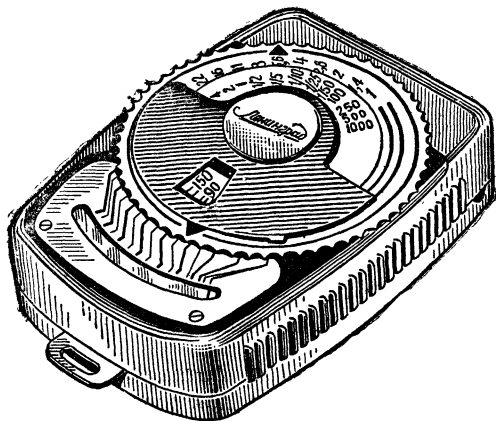


Рис. 201. Фотоэлектрический экспонометр.

какой другой волны к. п. д. излучения равен коэффициенту видности  $V_{(\lambda)}$ . В случае радиации, распределенной по всему спектру, к. п. д. излучения равен:

$$\eta = \frac{\sum \mathcal{E}_{(\lambda)} V_{(\lambda)}}{\sum \mathcal{E}_{(\lambda)}},$$

где  $\mathcal{E}_{(\lambda)}$  и  $V_{(\lambda)}$  имеют прежние значения.

При этом световая отдача излучения равна  $620\eta \text{ лм/вт}$ .

Световую отдачу излучения не следует смешивать со световой отдачей источника, равной числу люменов светового потока, получающегося на каждый ватт мощности, затраченной для получения излучения. Благодаря тому что во всех практических источниках света происходят потери энергии, вторая величина всегда меньше первой, так как не вся подводимая энергия превращается в излучение.

Световым к. п. д. источника света называют отношение его светотдачи к максимальной величине  $620 \text{ лм/вт}$ . Ясно, что световой к. п. д. обычно не равен энергетическому к. п. д. источника света, но растет с увеличением энергетического к. п. д.

### § 53. Температурные излучатели как источники света

На границу земной атмосферы падает в 1 мин около 2 кал на квадратный сантиметр лучистой энергии, испускаемой Солнцем. До поверхности Земли доходит заметно меньшее количество энергии: вследствие поглощения в атмосфере теряется около 25%.

На рис. 202 изображено распределение энергии в спектре Солнца на границе атмосферы и на поверхности Земли. Свойства человеческого глаза в результате естественного отбора в известной степени согласованы с этим распределением энергии. Человеческий

глаз реагирует как раз на область спектра, соответствующего значительной доле общего потока излучения Солнца. Несмотря на колоссальные размеры, Солнце на Земле может рассматриваться как точечный источник света, так как диаметр Солнца составляет всего одну тысячную расстояния до Земли. Яркость поверхности Солнца порядка 160 000 *сб*, видимая яркость несколько ниже вследствие поглощения в атмосфере. Для сравнения укажем, что наименьшая яркость, различимая глазом,  $10^{-10}$  *сб*.

Прямые лучи Солнца создают в 12 часов дня на Земле освещенность около 80 000 *лк*, к этому добавляется еще рассеянный свет неба около 20 000 *лк*. Конечно, эти данные сильно зависят от географической широты, времени года, часа и погоды (рис. 203).

Рассеянный свет неба имеет спектр, резко отличный от спектра Солнца: в нем очень усилена коротковолновая часть (§ 33).

Назначение искусственных источников света заключается в превращении подводимой энергии в видимую радиацию. Техническая проблема заключается в том, чтобы осуществить

превращение энергии с наибольшим к. п. д., т. е. возможно бóльшую часть затраченной мощности превратить в видимое излучение.

В настоящее время преимущественное распространение имеют источники света с светящимися накаливаемыми телами. Природа свечения пламени и современной электрической лампы одна и та же — температурное излучение. Современные повсеместно распространенные электрические лампы отличаются от свечи только способом нагревания светящихся тел: в то время как нить электрической лампы нагревается током, сажа в пламени нагрета теплотой горения свечи.

С повышением температуры интегральная интенсивность радиации черного тела возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры  $T$  (§ 49).

Согласно закону Вина (§ 49) при нагревании максимум излучения  $\lambda_{\max}$  постепенно приближается к видимой области

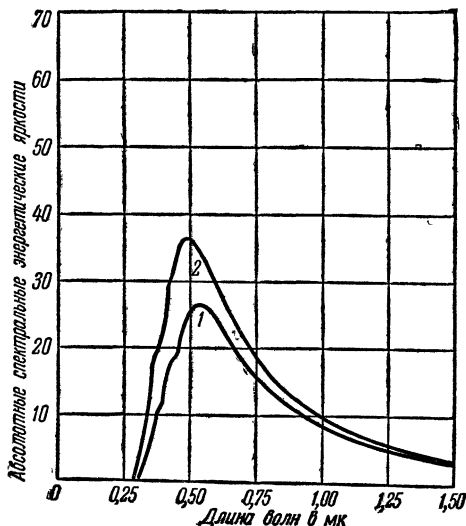


Рис. 202. Распределение энергии в спектре Солнца:  
1 — на поверхности Земли; 2 — на границе земной атмосферы.

спектра <sup>1)</sup> (рис. 204). Вследствие этого наблюдаемая глазом яркость  $B$  черного тела растет значительно быстрее, чем четвертая степень температуры. Вычисление показывает, что в области от 2000 до 3000° яркость приблизительно пропорциональна десятой степени температуры.

С точностью до 10% можно считать, что мощность, затрачиваемая на накал нити электрической лампы, полностью превращается в излучение. Из того, что общее излучение возрастает пропорционально четвертой степени температуры  $T$ , следует, что мощность  $W$ , необходимая для нагрева

волоска лампы, также пропорциональна четвертой степени температуры. В то же время наблюдаемая глазом яркость  $B$

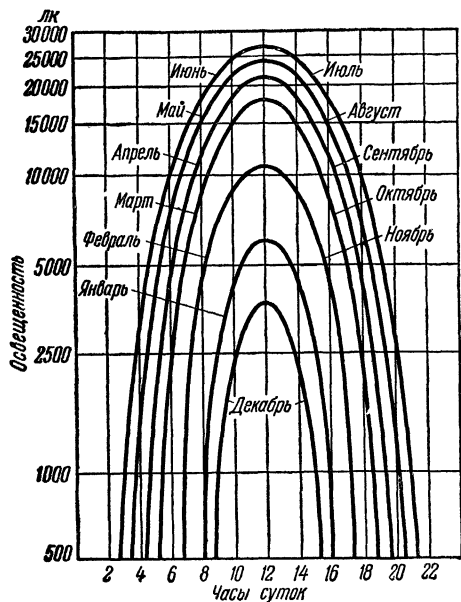


Рис. 203. Зависимость освещенности от времени года.

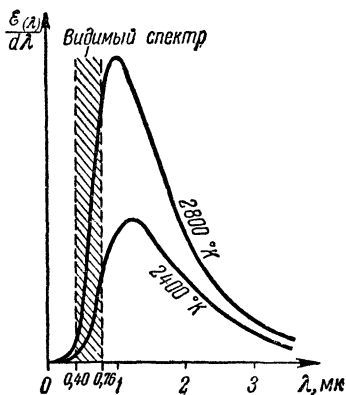


Рис. 204. Излучение черного тела при различных температурах.

пропорциональна десятой степени температуры. Поэтому к. п. д.  $\eta = \frac{B}{W}$  пропорционален шестой степени абсолютной температуры.

Сказанное относится, строго говоря, к к. п. д. и световой отдаче излучения абсолютно черного тела. Для реальных излучателей количественные соотношения будут несколько иными, но качественно картина останется той же. Для всякого температурного излучателя с возрастанием температуры очень быстро повышается как яркость, так и световая отдача.

<sup>1)</sup> Максимум излучения достигает границы видимого спектра при температуре 3850° абсолютной шкалы, при этой температуре  $\lambda_{\max} = 0,75 \text{ мк}$ .

Вследствие этого вся история электрической лампы в сущности представляет собой борьбу за достижение высокой температуры нити в условиях эксплуатации.

Первые практически пригодные лампы накаливания были созданы их изобретателем А. Н. Лодыгиным в 1873 г. Лодыгин не только создал лампы накаливания, но применил их для уличного освещения в Петербурге (т. II, § 1). Эдисон усовершенствовал конструкцию ламп накаливания, но его претензия на приоритет в изобретении лампы накаливания была отвергнута американским судом.

Первыми конструкторами электрической лампы в качестве материалов для нити был выбран уголь вследствие его тугоплавкости (температура плавления около  $4000^{\circ}\text{K}$ ). Оказалось, однако, что уже при сравнительно низких температурах, выше  $2200^{\circ}\text{K}$ , наблюдается чрезвычайно сильное распыление угольного волокна, быстро приводящее к его гибели. Так как одним из существенных требований, предъявляемых к лампе, является ее долговечность, то приходилось ограничиваться температурой около  $2200^{\circ}\text{K}$ , при которой лампа может гореть 500—1000 часов.

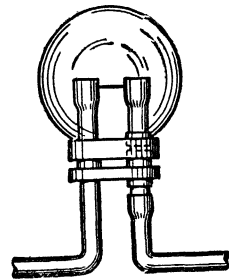


Рис. 205. Лампа Лодыгина.

При этой максимальной допустимой температуре угольная лампа имеет световую отдачу всего  $2\text{—}4\text{ лм/вт}$  и, следовательно, световой к. п. д. около  $0,5\%$ .

Естественно было ожидать, что распыление волоска должно быть тем меньше, чем дальше от точки плавления находится вещество, составляющее нить. Однако металлы обнаружили неожиданную стойкость при высоких температурах. Из тугоплавких металлов в о л ь ф р а м особенно отличается малым распылением. Имея температуру плавления около  $3700^{\circ}\text{K}$ , вольфрам выдерживает температуры накала, значительно более высокие, чем уголь. Это свойство повлекло повсеместное применение вольфрама для нитей ламп накаливания, несмотря на сложные технологические процессы, связанные с его обработкой.

В 1890 г. А. Н. Лодыгин запатентовал лампы накаливания с металлической нитью (рис. 205) из вольфрама, молибдена и других тугоплавких металлов (т. II, § 27, 1959 г.; в пред. изд. § 33).

В пустотных лампах с вольфрамовой нитью или, как их называют, экономический волосок накален до  $2500^{\circ}\text{K}$  с тем же сроком службы, что и у угольной лампы.

Накаленный вольфрам имеет еще одно преимущество перед углем: как и всякий металл, он обладает при данной температуре излучением, отличным от черного, во-первых, по интенсивности и, во-вторых, по его спектральному составу. Например, при температуре  $2500^{\circ}\text{K}$  полное излучение вольфрама равно излучению черного

тела, имеющего температуру всего  $1800^{\circ}\text{K}$ , но в то же время распределение энергии в излучаемом им спектре соответствует черному телу при температуре  $2560^{\circ}\text{K}$ . С точки зрения к. п. д. малая величина общего излучения не важна, так как слабо излучающее тело требует соответственно меньшей затраты мощности на нагревание. Отличие же в спектральном составе излучения является важным; оно называется *селективностью излучения*: при одинаковой температуре вольфрам излучает спектр, соответствующий по своему распределению черному телу при более высокой температуре. Как это сказывается на световой отдаче, видно из таблицы.

Зависимость световой отдачи от температуры

Температура в $^{\circ}\text{K}$	Световая отдача излучения в $\text{лм/вт}$	
	черное тело	вольфрам
2 000	1,5	3
2 500	7,5	11,5
3 000	19	27
3 500	33	47

Таким образом, металлическая нить позволяет значительно повысить световую отдачу лампы из-за большей допустимой температуры и из-за селективности излучения. От других тугоплавких металлов (тантал, осмий, родий) вольфрам отличается большой селективностью излучения, высокой температурой плавления и малым распылением при температуре, близкой к точке плавления. Световая отдача лампы с вольфрамовым волоском достигает  $7-8 \text{ лм/вт}$ , чему соответствует к. п. д., немногим больший 1%.

Распыление накаливаемого металла ограничивает возможности дальнейшего повышения температуры. Опыт показывает, что накаленная металлическая проволока, окруженная газом, распыляется гораздо слабее. Конечно, для этих опытов применяют инертные газы (азот, аргон), не вступающие в соединение с веществом нити.

Температуру нити при допустимой скорости распыления (срок службы нити  $500-1000$  часов) удается довести до  $3000^{\circ}\text{K}$  и даже выше, однако при этом практически лампы еще не делается экономичнее пустотной: охлаждающее действие газа, циркулирующего в колбе, настолько велико, что для достижения требуемой температуры необходим очень большой ток.

В 1913 г. Лангмюр построил лампу с газовым наполнением, имевшую световую отдачу, большую, чем пустотная. Этого результата ему удалось добиться после того, как была взята в качестве нити вольфрамовая проволока толщиной  $2 \text{ мм}$ .

Охлаждение нити происходит с поверхности проволоки, выделение тепла при прохождении тока происходит в ее объеме, следова-

тельно, толстые нити должны быть выгоднее, так как у них отношение объема к площади поверхности велико. Однако лампа с нитью толще 2 мм требует для накала огромного тока, десятков ампер, что в эксплуатации неприемлемо. Следовательно, нить должна быть тонкой, и в то же время отношение нагретого объема к поверхности должно быть большим. Для разрешения этого противоречия Лангмюр предложил воспользоваться спиральной нитью.

Современные наполненные газом лампы (их часто называют *полувайтными*) имеют металлический волосок, свернутый в виде плотной спирали, имеющей иногда 10—20 витков на 1 мм (рис. 206). Близ накаленной нити образуется тонкий неподвижный слой газа, и теплоотдача происходит только вследствие его теплопроводности; это обстоятельство делает спираль подобной сплошной трубке. Чем плотнее расположены витки спирали, тем это выгоднее, так как тем меньше обтекаемая газом поверхность.



Рис. 206. Нить газополной лампы.

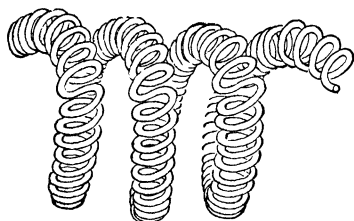


Рис. 207. Нить биспиральной лампы.

В последнее время стали изготавливать лампы с двойным скручиванием нити (рис. 207)—*биспиральные лампы*. Светоотдача биспиральных ламп процентов на 20 выше, чем ламп с одинарной спиралью.

Газ, наполняющий колбу лампы, должен быть по возможности наименее теплопроводным. В этом отношении аргон значительно выгоднее азота. В настоящее время он широко применяется, особенно для наполнения мощных ламп. Еще более выгодной является смесь криптона с ксеноном — чрезвычайно тяжелых инертных газов. Применение криптоно-ксеноновой смеси для маломощных ламп дает увеличение светоотдачи около 30% (с одинарной спиралью).

Экономичность газового наполнения видна из приводимой таблицы (стр. 228), в которую включены современные, наиболее совершенные в сравнении с пустотной наполненные газом лампы.

Согласно стандарту у ламп теперь указывается не сила света, а световой поток. Среднюю силу света можно получить, разделив потоки на 4л.

Яркость нити маломощных ламп порядка 600 *сб*, яркость нити мощных ламп около 2000 *сб*.

Наивысший к. п. д. ламп накаливания едва достигает 5% (рис. 208). Зажигая электрическую лампу, мы подводим к ней электрическую энергию, большая часть которой рассеивается в виде невидимого теплового излучения. Тепловое излучение ламп накаливания

## Характеристика газополных ламп

Мощность в <i>вт</i>	Световой поток в <i>лм</i>	Температу- ра в °К	Световая отдача в <i>лм/вт</i>	К. п. д. в %	Примечание
200	3 050	2 870	15,25	2,6	Для кинопроекции с перекалом и малым сроком служб (100—200 часов)
1 000	19 000	3 030	19,00	3,5	
1 000	22 200	3 290	22,20	4,4	
10 000	310 000	3 350	31,00	5,0	
50	500	2 500	10	1,6	Пустотная

даже получило за последние годы важное практическое применение. Оказалась весьма экономичной сушка различных предметов при помощи инфракрасных лучей, испускаемых лампами накаливания.

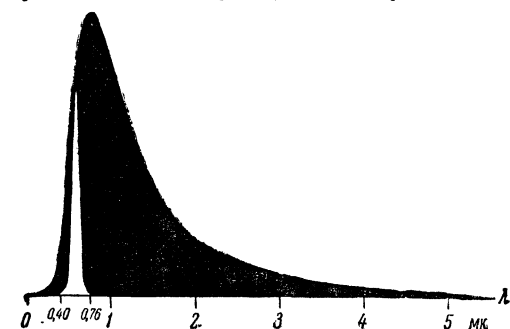


Рис. 208. Относительное распределение энергии в спектре излучения вольфрама при  $T=3350^{\circ}\text{K}$  (или черного тела при  $T=3500^{\circ}\text{K}$ ). Световая отдача — белая площадь  $31\text{ лм/вт}$ .

Мы видели, что некоторое улучшение ламп накаливания позволяет внести повышение температуры; однако для черного тела так будет продолжаться только до  $6700^{\circ}\text{K}$ , когда положение в спектре максимума излучения совпадает с наиболее сильно действующими на глаз зелеными лучами ( $\lambda=0,556\text{ мкм}$ ). При дальнейшем повышении температуры яркость будет по-прежнему возрастать, в то время как световая отдача начнет понижаться в связи с дальнейшим перемещением области наибольшего излучения в сторону коротких волн. При этом максимальный световой к. п. д. излучения при температуре, равной  $6700^{\circ}\text{K}$ , оказывается равным 14%. Селективность излучения веществ слишком незначительна, чтобы сколько-нибудь существенно изменить положение дела. Кроме того, с повышением температуры накаливаемые тела по своим излучательным

установки для *инфракрасной сушки* окрашенных автомобильных кузовов (рис. 209). Такие же установки успешно работают в авиационной и электротехнической промышленности.

Мы видели, что некоторое улучшение ламп накаливания позволяет внести повышение температуры; однако для черного тела так будет продолжаться только до  $6700^{\circ}\text{K}$ , когда положение в спектре максимума излучения совпадает с наиболее сильно действующими на глаз зелеными лучами ( $\lambda=0,556\text{ мкм}$ ). При дальнейшем повышении температуры яркость будет по-прежнему возрастать, в то время как световая отдача начнет понижаться в связи с дальнейшим перемещением области наибольшего излучения в сторону коротких волн. При этом максимальный световой к. п. д. излучения при температуре, равной  $6700^{\circ}\text{K}$ , оказывается равным 14%. Селективность излучения веществ слишком незначительна, чтобы сколько-нибудь существенно изменить положение дела. Кроме того, с повышением температуры накаливаемые тела по своим излучательным

свойствам приближаются к абсолютно черному телу. Таким образом, 14% представляют собой верхний предел светового к. п. д. для всех температурных источников света.

Более высокие температуры твердых тел дает электрическая дуга между угольными электродами, открытая В. Петровым в 1802 г. (т. II, § 1 и 48, 1959 г.; в пред. изд. § 55).

В обычной угольной дуге с силой тока 10—20 а лишь 5% светового потока излучается самой дугой; остальные 95% приходятся на

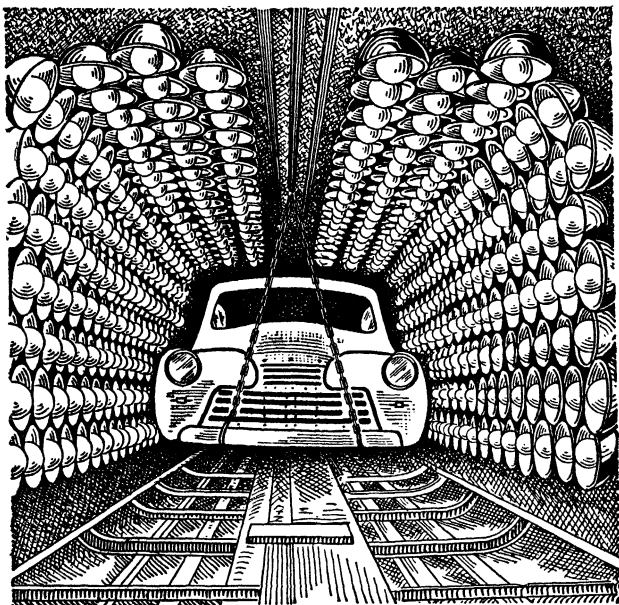


Рис. 209. Туннель для сушки автомобилей инфракрасными лучами.

долю температурного свечения углей. Если дуга горит при постоянном токе, то положительный электрод, бомбардируемый электронами и отрицательными ионами, получающимися при разряде, светится особенно ярко. *Кратер* положительного электрода (впадина, образующаяся в нем) излучает 85% всего светового потока. Только 10% приходится на катод. Поверхность электродов нагревается до чрезвычайно высокой температуры. В угольной дуге температура кратера превышает  $4000^{\circ}\text{K}$ , в то время как у катода она немногим выше  $3000^{\circ}\text{K}$ . Вследствие этого излучение кратера значительно интенсивнее, чем катода.

В так называемой *интенсивной* дуге (рис. 210) с огромной силой тока (150—300 а) температура кратера достигает иногда  $5000^{\circ}\text{K}$ ,



а яркость — 120 000 *сб* (вольфрам при 3000° К имеет яркость только 1257 *сб*). При давлении воздуха выше 20 *атм* Люммеру удалось получить температуру анода 5900° К, т. е. почти равную температуре поверхности Солнца (т. II, § 48, 1959 г.; в пред. изд. § 55).

С энергетической стороны к. п. д. излучения дуг чрезвычайно велик по сравнению с лампами накаливания. Однако эксплуатационные качества их невысоки из-за необходимости применять последовательное сопротивление и сложную аппаратуру, связанную с непрерывным сближением обгорающих углей. Электрические дуги обычно применяются в тех случаях, когда необходим источник света очень большой яркости (в прожекторах).

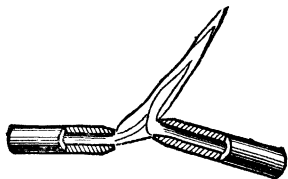


Рис. 210. Дуга интенсивного горения.

интенсивного горения. Отдельные максимумы соответствуют спектральным полосам молекул, образующихся при горении (например, молекул циана CN).

В последнее время стали применять сверхмощные дуги, в которых разряд идет сквозь узкий канал, образуемый слоем воды, протекающей по внутренней поверхности металлической трубы. Из такой трубы вырывается плазменный язык, в котором температура достигает 10 000—15 000°. Однако в качестве источников света подобные дуги пока мало пригодны, так как они потребляют большую мощность, достигающую тысяч киловатт, громоздки и конструкция их не обеспечивает хорошего использования светового потока, испускаемого светящимися частями разряда. Сверхмощные дуги используют главным образом в качестве высокотемпературных источников (в частности, для термического испытания материалов).

Электрические дуги специального устройства, в которых излучение междуэлектродного промежутка играет большую роль в общем световом потоке, рассмотрены далее (§ 76).

Использование свечения газов позволило решить проблему создания источников холодного света, обладающих очень высоким световым к. п. д. и дающих свет, близкий к дневному.

На рис. 211 изображено распределение энергии в спектре излучения дуги интенсивного горения.

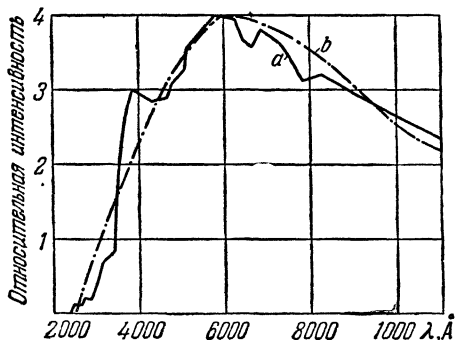


Рис. 211. Распределение энергии в спектре дуги интенсивного горения:

*a* — интенсивная дуга при  $I=150$  *a*; *b* — черное тело при  $T=4500^{\circ}$  К.

Для фотографических целей большой интерес представляют импульсные источники света, дающие очень яркие кратковременные световые вспышки (фотовспышки). Такие вспышки получаются в результате разрядки конденсатора большой емкости (порядка 1000 мкф) через соответствующую газоразрядную лампу. В зависимости от конструкции лампы и схемы питания можно получать вспышки длительностью от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  сек.

На рис. 212 представлена схема зажигания импульсной лампы. Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  получают заряд от батареи  $B$  при замкнутом

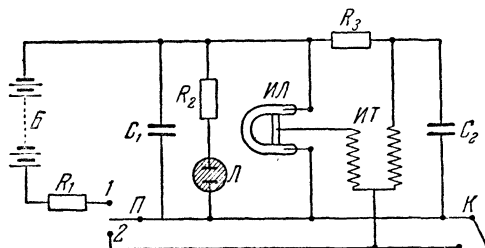


Рис. 212. Схема включения импульсной лампы.

контакте 1 переключателя  $\Pi$ . В момент съемки замыкают контакт 2 переключателя и синхроконттакт  $K$ ; при этом конденсатор  $C_2$  разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора  $ИТ$ , вызывая ионизацию газа в импульсной лампе  $ИЛ$ , через которую мгновенно разряжается конденсатор  $C_1$ . В результате в этой лампе получается мощная световая вспышка (длительностью 0,5—0,7 мсек). Спектральный состав вспышки близок к спектральному составу солнечного света. Через 5—10 сек конденсаторы вновь заряжаются и лампа готова к очередной вспышке (загорается сигнальная лампа  $L$ ).