

# О МЕТОДЕ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП В РЕЖИМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЕНИЯ

Кандидаты техн. наук В. С. ЛИТВИНОВ, М. М. ХОДАИР  
и инж. Ю. П. ГУРОВ

Московский энергетический институт

Расчетными и экспериментальными исследованиями, проведенными в МЭИ [Л. 1, 2], была установлена необходимость разработки инженерного метода ускоренного определения срока службы люминесцентных ламп (л. л.) в режиме непрерывного горения  $\tau_{н.г.}$ .

Разработка методов оперативной оценки реального и стендового сроков службы л. л., крайне нужных для решения многих светотехнических задач [Л. 1], практически невозможна без создания метода ускоренного определения  $\tau_{н.г.}$ .

В соответствии с оценочными исследованиями [Л. 2] указанный метод предполагалось создать на базе выявления закономерности перемещения катодных пятен (к. п.) при испытании л. л. в режиме непрерывного горения. Для этого было необходимо: выявить закономерность перемещения среднего — по обследуемым электродам — катодного пятна; разработать метод определения положения к. п. и средней скорости расхода оксида  $\bar{V}_{к.п.}$  на различных стадиях работы л. л. в режиме непрерывного горения (р. н. г.); предложить метод, позволяющий по данным испытаний на ограниченном количестве ламп прогнозировать  $\tau_{н.г.}$  за время порядка  $0,1 \tau_{н.г.}$ ; провести исследования на стенах, обеспечивающих практически идентичное ждущее зажигание л. л., поскольку по условиям испытаний в МЭИ лампы можно было испытывать лишь в цикле 12 ч «включено» и столько же — «отключено».

Положение и перемещение к. п. можно в принципе определять по величинам напряжений на электроде [Л. 2]. Эксперименты под-

твердили нецелесообразность оценки положения к. п. по измерениям на переменном токе [Л. 2] и указали на возможность использования установившихся (на постоянном токе) значений напряжений на электроде  $\bar{U}_k^y$  (рис. 1) для определения положения и скорости перемещения к. п. Определение расхода оксида по  $\bar{U}_k^y$  иллюстрировалось [Л. 2] полученной на ограниченном количестве специальных ламп практически линейной зависимостью средних значений установившихся напряжений на катоде  $\bar{U}_k^y$  от числа витков биспирали, свободных от оксида  $n_b$ . В настоящей работе зависимость  $\bar{U}_k^y = f(n_b)$  была вновь оценена на 20 л. л., испытываемых в р. н. г., у которых просматривались электроды. Получено (рис. 2), что зависимость  $\bar{U}_k^y = f(n_b)$  практически линейна, а поэтому в дальнейшем, при выявлении закономерности расхода оксида и при определении  $\bar{V}_{к.п.}$ , положение к. п. на электроде оценивалось по  $\bar{U}_k^y$ .

При известных положениях к. п. на испытываемых электродах (рис. 3) несложно рас-

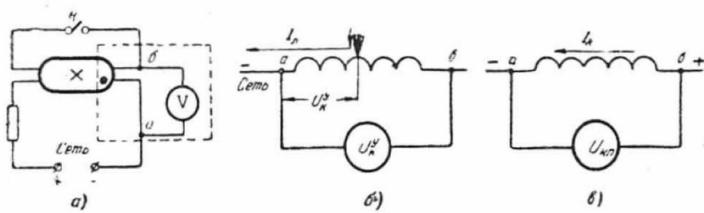


Рис. 1. Принципиальная схема измерений напряжений на катоде.  
а — общая вид схемы при работе л. л. на постоянном токе; б — узел схемы, поясняющий определение  $U_k^y$ ; в — узел схемы, поясняющий определение  $U_{к.окс.}^y$ .

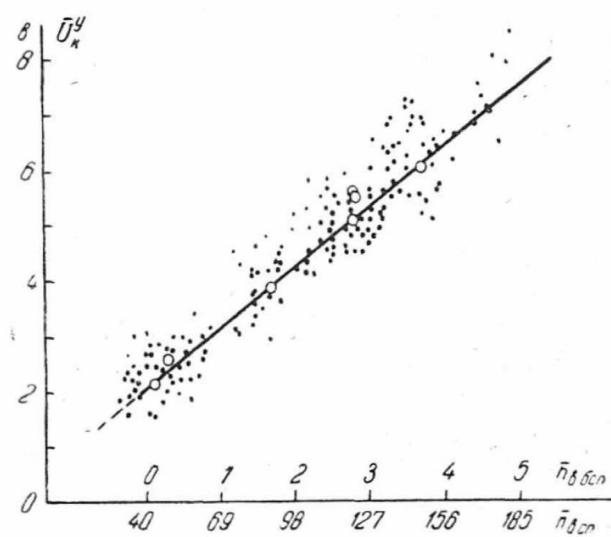


Рис. 2. Градуировочный график изменения  $U_k^y$  в зависимости от числа витков биспирали (спирали), пройденных катодными пятнами (● — экспериментальные значения по отдельным катодам; ○ — средние значения  $U_k^y$  по всем катодам для определенного времени испытаний).

считать средние скорости расхода оксида  $\bar{V}_{\text{к.п}}$  за тот или иной интервал испытания ламп. Указанные скорости могут быть определены как по отдельным электродам, так и по совокупности катодов ламп, обследуемых в определенном р. н. г. Данные, приведенные на рис. 3 для двух режимов испытаний, указывают на сложный характер перемещения к. п., а также на необходимость осторожного подхода к оценке  $\bar{V}_{\text{к.п}}$  по отдельным катодам.

Для того чтобы данные о  $U_{\text{k}}^y$  свидетельствовали о положении и скорости перемещения катодных пятен в стандартных лампах, необходимо оценить погрешности отсчета, обусловленные возможным разбросом давлений инертного газа  $p_g$ , провисанием биспиралей, изменением диаметра нити биспиралей  $d$  в процессе эксплуатации, а также определить напряжения на электродах к моменту выхода ламп из строя  $U_{\text{к.пр}}^y$ .

Рассмотрением баланса энергии на свободной от оксида части катода при разбросах и изменениях  $p_g$  в процессе эксплуатации, отклонениях в коэффициентах шага  $k_{\text{ш}}$  (эквивалент провисания биспиралей), изменениях  $d$  вследствие теплового распыления установлено, что реально возможные отклонения  $p_g$ ,  $k_{\text{ш}}$  и  $d$  ( $\pm 0,5 p_{g,\text{ном}}$ ,  $\pm 0,2 k_{\text{ш},\text{ном}}$ ,  $-0,01 d$ ) в процессе горения ламп (за время  $\sim 0,1 \tau_{\text{н.г.}}$ ) практически не скажутся на точности определения положения к. п. Максимальная относительная погрешность при предполагаемом наибольшем одновременном изменении всех трех факторов не превышает 5—6%.

При выявлении среднего предельного положения катодных пятен, т. е. при нахождении величины, пропорциональной  $\tau_{\text{н.г.}}$ , оценивались

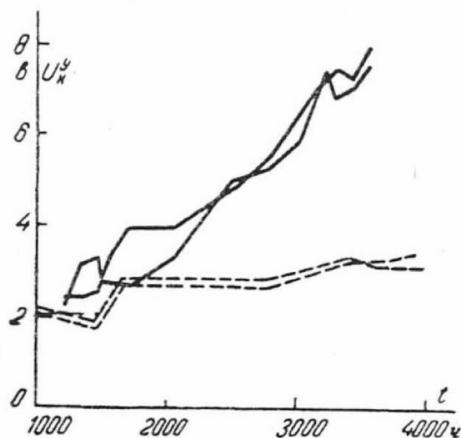


Рис. 3. Зависимости перемещения катодных пятен (в масштабе  $U_{\text{k}}^y$ ) от времени испытаний.

— два катода ламп МЭЛЗ ЛБ40-63 ( $I_{\text{л}} \approx 1,5 I_{\text{л.ном}}$ ); - - - два катода ламп МЭЛЗ ЛДЦ40-61 ( $I_{\text{л}} \approx I_{\text{л.ном}}$ ).

как экспериментальные, так и расчетные способы определения параметров катода к моменту погасания лампы. В этом смысле заслуживал внимания метод мгновенных отсчетов, позволяющий в принципе фиксировать текущее положение к. п., а также перепад напряжения, пропорциональный  $\tau_{\text{н.г.}}$ . С помощью этого метода положение к. п. определяется напряжением на электроде в момент переключения (л. л. работает на постоянном токе) питания на стартерный конец электрода  $U_{\text{k.0}}^M$

[начальная ордината кривой  $U_{\text{k.0}}^M = f(t)$ ]. Величина  $U_{\text{k.0}}^M = IR_{\text{k.0}}^M$ , где  $I$  — ток, при котором проводятся измерения;  $R_{\text{k.0}}^M$  — сопротивление электрода на участке к. п.—стартерный ввод в момент переключения питания. Так как участок с сопротивлением  $R_{\text{k.0}}^M$  имеет  $T \approx 300^\circ\text{K}$ , то  $U_{\text{k.0}}^M$  не зависит от рода и давления газа, охлаждающего действия электрода и т. п.; это исключает дополнительные погрешности, обусловленные неизменностью температуры вольфрама на участке ввода—начала биспиралей, которые имеют место (при отсчете  $U_{\text{k}}^y$ ), если к. п. находится на спиральной части катода. Зная величины  $U_{\text{k.0}}^M$  — текущие и в момент выхода катода из строя — можно выявить закономерность расхода оксида и определить  $\tau_{\text{н.г.}}$ . Хотя определение текущего положения к. п., скорости перемещения  $V_{\text{к.п}}$  и  $\tau_{\text{н.г.}}$  в принципе возможно по данным о  $U_{\text{k.0}}^M = f(t)$  при каждом отсчете и в процессе испытания ламп, решено было временно от этого отказаться, поскольку изменения  $U_{\text{k.0}}^M$  при двух отсчетах (через 150—200 ч) составляют для катодов л. л. мощностью 40 вт приблизительно 0,01 в (измерения при  $I = 0,41$  а); в момент переключения имеют место (при наличии в контуре реактивных элементов) переходные процессы, затрудняющие отсчет  $U_{\text{k.0}}^M$ ; по мере перемещения к. п. будет все более нагреваться часть катода, на которой измеряется  $U_{\text{k.0}}^M$ , что может привести к неточной информации о перемещении к. п.

Изложенное побудило более внимательно подойти к оценке предельного положения к. п. по методу установившихся отсчетов. Исследованиями, проведенными в МЭИ, было показано, что температура вольфрама зависит от привеса оксида: при катоде, свободном от оксида, температура вольфрама заметно выше температуры катода новой лампы. Это обусловлено тем, что интегральный коэффициент излучения вольфрама (в обследуемом диапазоне температур) значительно (на полпоряд-

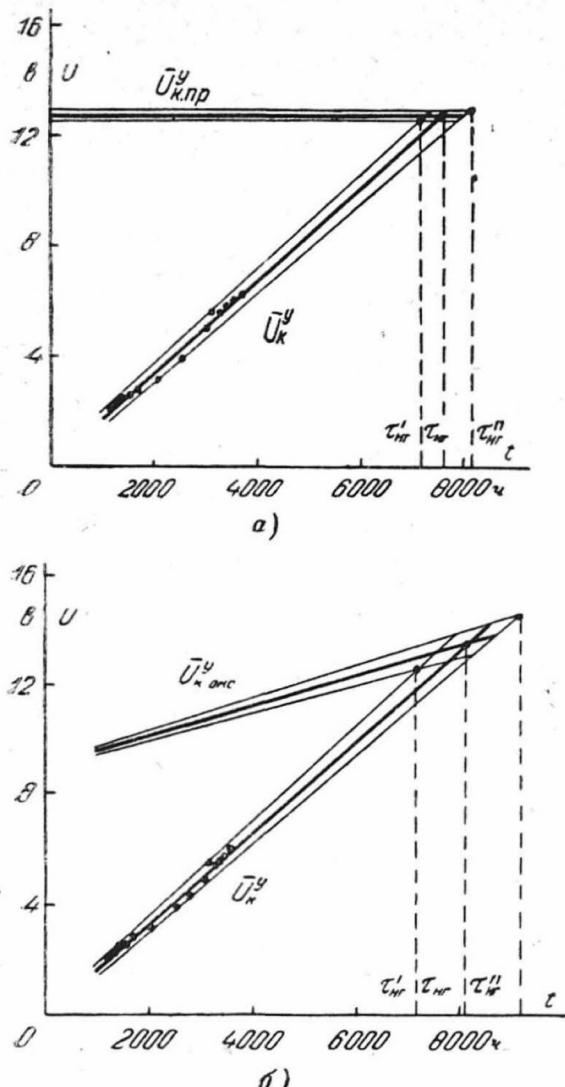


Рис. 4. Определение ожидаемого срока службы л. л. в режиме непрерывного горения (на примере ламп ЛБ40-63,  $I_l \approx 1,5I_{l,nom}$ ).  
а — для варианта, когда известно  $\bar{U}_k^{y,pr}$ ; б — при определении по  $\bar{U}_k^{y,okc}$ .

ка) меньше такового для оксида. Для заданной конструкции катода, принятом токе измерений, полагая, что к моменту погасания лампы привес оставшегося оксида (по данным ВНИСИ), как правило, не более 3—5% от первоначального, несложно рассчитать  $\bar{U}_k^{y,pr}$  — среднее напряжение на электродах, практически свободных от оксида (на рис. 4  $\bar{U}_k^{y,pr} \approx 12,5$  — 13,0 в для катодов л. л. мощностью 40 вт). Однако подобный путь определения  $\bar{U}_k^{y,pr}$  неприемлем для стандартных л. л., поскольку привес оксида, конструкция катодов и условия наполнения обычно неизвестны. Поэтому предельное положение к. п. в стандартных лампах  $\bar{U}_k^{y,pr}$  целесообразно определить по выражению:

$$\bar{U}_{1,pr}^y = a_1 + b_1 \left( \frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2} \right),$$

где  $a_1, a_2, b_1$  и  $b_2$  — постоянные, определяемые из соотношений  $\bar{U}_k^y = a_1 + b_1 t_{n,g}$  и  $\bar{U}_{k,okc}^y = a_2 + b_2 t_{n,g}$ .

$\bar{U}_{k,okc}^y$  — среднее напряжение на электродах при их подогреве током, при котором измеряются  $\bar{U}_k^y$  (без  $\bar{U}_k^y$  для стартерного конца катода  $\bar{U}_{k,st}^y$ :  $\bar{U}_{k,okc}^y = \bar{U}_{k,st}^y - \bar{U}_{k,okc}^y$ , рис. 1, б);  $t_{n,g}$  — время непрерывного горения; при  $t_{n,g} = t_{n,g}$ ;  $\bar{U}_{k,okc}^y = \bar{U}_{k,pr}^y$ . Рисунок 4, б иллюстрирует указанное положение.

Количество ламп (катодов)  $n$ , необходимых для получения результатов с допустимой относительной ошибкой истинного среднего значения  $\delta = \frac{\bar{x} - \mu}{s}$  ( $\bar{x}$  — среднее значение измеряемой величины;  $\mu$  — граница доверительного интервала;  $s^2$  — дисперсия), находится из известного соотношения [Л. 3]:

$$n = t_\alpha^2 \frac{s^2}{(\bar{x} - \mu)^2} \quad (t_\alpha — \text{распределение Стьюдента})$$

Величиной  $\delta$  обычно задаются на основании предшествующих исследований или оценочных экспериментов. Поскольку обычно допустимо  $\delta \approx 0,3 \div 0,4$ , вполне достаточно 20—25 л. л. (40—50 катодов, доверительная вероятность 0,90—0,95).

Минимальное время испытаний при принятом интервале между замерами  $t_3 = 150 \div 200$  ч предлагаются оценивать следующим образом. При принятых  $t_3$  по 3, 4, ...,  $n_u$  экспериментальным значениям  $\bar{U}_k^y$  строятся по методу наименьших квадратов линии регрессии  $\bar{U}_k^y = f(t_{n,g})$ , и для каждой группы экспериментальных точек определяется ожидаемый срок службы л. л.  $t_{n,g}$ . По полученным данным наносится кривая  $t_{n,g} = f(n_u)$ , которая, как показали исследования, имеет вид затухающих ко-

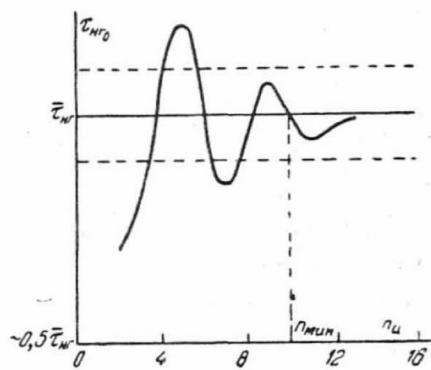


Рис. 5. Схема определения минимального числа последующих изменений положений катодных пятен  $n_{min}$ .

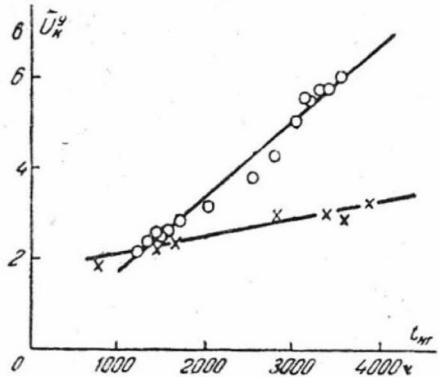


Рис. 6. Зависимости, иллюстрирующие (в масштабе  $\bar{U}_k^y$ ) перемещение катодных пятен в режимах непрерывного горения.

○—л. л. МЭЛЗ ЛБ40-63,  $I_l \approx 1,5 I_{l,nom}$ ;  
×—л. л. МЭЛЗ ЛДЦ40-61,  $I_l \approx I_{l,nom}$ .

лебаний около действительного срока службы л. л. в р. н. г. (рис. 5). Интересующее  $n_{min}$  определяется отсчетом, начиная с которого амплитуда ожидаемых колебаний  $\tau_{n,g}$  будет находиться в пределах области приемлемой ошибки, а минимальное время испытаний  $t_{min} \approx \approx t_3 n_{min}$ .

Результаты экспериментальных исследований. Испытания л. л. в режиме непрерывного горения из-за невозможности круглогодичной работы стендов проводились с ежедневным перерывом в 12 ч. Поэтому включение л. л. с целью снижения разрушающего действия процесса зажигания было максимально облегченным, т. е. ждущим. Специальной полуавтоматической схемой обеспечивался предварительный (3—4 сек) подогрев электродов ( $I_p = 0,55 A$ ), после чего на л. л. подавалось напряжение, необходимое для зажигания. После этого косвенный подогрев электродов отключался.

Испытания проводились как на стандартных (МЭЛЗ, ЛДЦ40-61), так и на специальных, с очищенными от люминофора концами трубок, л. л. (МЭЛЗ, ЛБ40-63). Последние, кроме выполнения основных задач, позволили установить связь между  $\bar{U}_k^y$  и числом витков биспирали, свободных от оксида (рис. 2, коэффициент корреляции 0,98). Лампы ЛДЦ40-61 (21 шт.) испытывались в режиме, близком к номинальному ( $I_l \approx I_{l,nom}$ ), а ЛБ40-63 (17 шт.) — при  $I_l \approx 1,5 I_{l,nom}$ \*. Обследование л. л. на повышенном токе позволило за ограниченный промежуток времени получить наи-

более достоверные данные о среднем характере движения катодных пятен в р. н. г. [при  $I_l \approx 1,5 I_{l,nom}$  электроды работали с явно выраженным катодным пятном, и выход л. л. по перегоранию биспирали был не выше (две л. л.), нежели при работе в номинальном режиме]. Оценка  $\bar{U}_k^y$  проводилась по всем катодам обследуемых ламп, поскольку в настоящее время отсутствует четкое представление о худшем катоде, а совокупность обследуемых электродов характеризует качество оксидного покрытия данной партии ламп. По полученным данным о  $\bar{U}_k^y$  по методу наименьших квадратов определялись уравнения регрессии  $\bar{U}_k^y$  на  $t_{n,g}$  и оценивалась их степень приближения к прямолинейной зависимости. Коэффициент корреляции, например, для прямой  $\bar{U}_k^y = 1,6 \cdot 10^{-3} t_{n,g} - 0,04$  (в), весьма высок ( $\sim 0,96$  для ламп ЛБ40-63). На рис. 6 приведены данные о  $\bar{U}_k^y$  для обеих обследуемых групп л. л., а также соответствующие линии регрессии. Данные по л. л. типа ЛБ40-63 ( $I_l = 1,5 I_{l,nom}$ ), у которых к. п. прошло около половины биспирали, указывают на практическое постоянство расхода оксида в р. н. г.<sup>1</sup>. Подтверждение [Л. 2] предположения о практически постоянной средней скорости перемещения к. п. в режиме непрерывного горения на л. л. типа ЛБ40-63 побудило для л. л., испытываемых при  $I_l \approx I_{l,nom}$ , строить лишь  $\bar{U}_k^y = f(t_{n,g})$  (по методу наименьших квадратов) и доверительные интервалы для  $\bar{U}_k^y$  (рис. 4). Результаты испытаний и соответствующие способы определения предельных положений к. п. для ламп ЛБ40-63 приведены на рис. 4, на котором с учетом доверительных интервалов для  $\bar{U}_k^y$ ,  $\bar{U}_{k,pr}^y$  и  $\bar{U}_{k,okc}^y$  оценены области возможных средних значений  $\tau_{n,g} (\tau'_{n,g} - \tau''_{n,g})$ . Прогнозирование  $\tau_{n,g}$  указанными выше способами позволяет полагать, что для л. л. ЛБ40-63 ( $I_l \approx 1,5 I_{l,nom}$ )  $\tau_{n,g} = (7,6 \pm 0,5) \cdot 10^3$  ч [или  $(8,1 \pm 1,0) \cdot 10^3$  ч], а для л. л. ЛДЦ40-61, обследованных при  $I_l \approx I_{l,nom}$ ,  $\tau_{n,g} = (27,6 \pm 3,5) \cdot 10^3$  ч (определение  $\tau_{n,g}$  проводилось только по схеме, приведенной на рис. 4, б).

Проведенные исследования могут рассматриваться как начало работ в области разработки инженерных методов ускоренного определения срока службы оксидных катодов в р. н. г. Для исчерпывающего рассмотрения вопроса необходимо:

\* Испытания проводились для выявления закономерности расхода оксида на большей части витков биспирали.

<sup>1</sup> По крайней мере при расходе оксида на первой половине биспирального катода.

1. Провести при стартерном зажигании испытания нескольких групп л. л. вплоть до выхода всех ламп из строя ( $I_{л}=var$ , варианты л. л.). Это позволит получить исчерпывающие статистические данные — при определении  $\tau_{н.г}$  с заданной точностью — для однозначного расчета минимального времени испытаний л. л. различного качества. Указанные исследования частично проводятся в лаборатории контроля ВНИСИ<sup>2</sup>.

2. Изучить характеристики и условия формирования к. п. при различных косвенных подогревах электродов, вариантах конструктивных решений катодного узла, токах ламп, искажениях формы кривой тока и условиях наполнения л. л.

3. Исследовать расход оксида на различных стадиях после возникновения в л. л. двухполупериодного дугового разряда (для вариантов условий и фазы тока подогрева электродов, типов катодов и т. п.).

<sup>2</sup> Следует проводить испытания при длительности цикла  $t_{ц} \rightarrow \infty$ , поскольку выполненные в МЭИ исследования ( $t_{ц} \approx 12 \text{ ч}$ ) несколько занизили прогнозируемый срок службы в р. н. г.

4. Начать глубокие теоретические и экспериментальные исследования, которые бы позволили рассчитывать распыление и испарение компонентов оксида при различных р. н. г. и давлениях инертного газа.

5. Разработать методы, позволяющие оценивать достоверность экстраполяции доверительных интервалов средних положений к. п. и ускоренно определять кривые выхода л. л. из строя. Последнее особенно необходимо для ускоренного определения кривой выхода ламп в реальных условиях.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Э. И. Миль и Н. В. Рожкову (ВНИСИ) за активное содействие при выполнении настоящей работы, Е. В. Мерзлоухову (МЭЛЗ) за помощь в изготовлении специальных ламп, коллектив кафедры светотехники и источников света МЭИ за повседневное участие и помощь.

### Литература

1. Литвинов В. С., «Светотехника», 1964, № 5.
2. Литвинов В. С., Ходакир М. М., Рошин Е. В., «Светотехника», 1965, № 2.
3. Левин С. М. Статистический контроль качества и надежности источников света, ЦИНТИэлектропром, 1963.

УДК 621.327

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ С КАТОДАМИ, ИМЕЮЩИМИ ОКСИДНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ПЕРЕКИСИ БАРИЯ

Канд. техн. наук Д. С. МАЛЫШЕВА

Всесоюзный светотехнический институт

Как известно, в люминесцентных лампах в качестве катода используется биспираль из вольфрамовой проволоки (диаметром 63 мкм для ламп мощностью 15 вт и 73—78 мкм для ламп 30 вт) с оксидным покрытием на основе карбонатов бария, стронция и кальция.

В процессе горения происходит расход оксидного покрытия. Катод (за исключением случая обрыва спирали), а следовательно, и лампа выходят из строя, когда полностью израсходован оксид. Работами ряда исследователей [Л. 1—5] было установлено, что катод в люминесцентной лампе является самокалящимся, саморегулирующимся и работает не всей поверхностью, а лишь частью ее, на которой расположено катодное пятно. Это пятно передвигается вдоль катода по мере расходования оксидного покрытия, пока не достигнет последнего витка. После этого лампа гаснет,

а биспираль становится блестящей. Иллюстрацией движения катодного пятна могут служить фотографии, приведенные на рис. 1.

Срок службы катодов определяется скоростью расходования оксидного покрытия, зависящей от привеса и природы оксидного покрытия, эмиссионных свойств катода и от величины сил сцепления оксида с керном.

Проведенными в 1959—1963 гг. во ВНИСИ работами установлено, что эмиссионные свойства катодов с оксидным покрытием на основе тройного карбоната с примесью двуокиси циркония зависят от режима обработки катодов. Показано, что прослойка, состоящая из вольфрамата бария  $\text{Ba}_3\text{WO}_6$ , которая образуется при разложении карбонатов, снижает эмиссионные свойства и долговечность катодов. Дополнительное активирование катодов при  $T = 1200 \div 1250^\circ\text{C}$  после разложения карбона-