

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9:537.7

Измерение катодного и анодного падений напряжений в мощных амальгамных лампах низкого давления

Л. М. Василяк, А. И. Васильев, С. В. Костюченко, Д. В. Соколов,
А. Ю. Старцев Н. Н. Кудрявцев

Впервые измерены катодное и анодное падения напряжения в мощных амальгамных лампах низкого давления. Погонная электрическая мощность лампы 2,4 Вт/см, рабочий ток 3,2 А, его частота 43 кГц. Метод определения катодного падения напряжения основан на изменении падения напряжения на электродах лампы при изменении тока накала ее электродов в стационарном режиме работы. Другим независимым способом определено суммарное (катодное плюс анодное) падение напряжений на электродах лампы. Максимальное катодное падение напряжения 10,8 В, анодное падение напряжения, соответствующее максимальному катодному падению напряжения, составило 2,4 В. Показано, что в мощных амальгамных лампах низкого давления анодное падение напряжения вносит значительный, а в некоторых случаях основной вклад в нагрев электродов, поэтому им нельзя пренебрегать при конструировании электродных узлов и электронного пускорегулирующего аппарата (ЭПРА), работающих на токах частотой в десятки килогерц.

PACS: 52.25.-b

Ключевые слова: дуговой разряд, УФ-излучение, амальгамная лампа, обеззараживание воды.

Введение

Мощные амальгамные лампы дугового разряда низкого давления являются наиболее эффективным источником бактерицидного УФ-излучения, поэтому они используются в установках для обеззараживания воды с большими расходами. Поскольку расход воды в течение суток подвержен большим колебаниям, от пиковых нагрузок днем до минимальных значений ночью, то для эконо-

мии электроэнергии необходимо уменьшать суммарную мощность источников УФ-излучения. Так как постоянное отключение ламп или их секций приводит к существенному уменьшению времени их жизни [1, 2], то изменение мощности УФ-излучения ламп производится путем регулирования их тока разряда.

На станциях обеззараживания воды число используемых ламп составляет несколько сотен, а в крупных городах даже несколько тысяч, и их замена составляет существенную часть эксплуатационных расходов, поэтому ресурс таких ламп должен быть достаточно велик.

Время жизни мощной амальгамной лампы дугового разряда определяется расходом оксидного материала, находящегося на электроде. Разрушение эмиссионного слоя электродов в стационарном периоде работы лампы происходит вследствие бомбардировки его ионами в катодный полупериод и нагрева электронами — в анодный. Расход эмиссионного вещества зависит от температуры электрода и режима катодного пятна, которое находится на электроде в стационарном режиме работы лампы [3—5].

Энергии ионов, выпадающих на электрод, определяются в катодный полупериод рабочего тока

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник. Обьединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 127412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Тел. (495) 484-18-10. E-mail: vasiyak@ihed.ras.ru.

Васильев Александр Иванович, заместитель директора.

Костюченко Сергей Владимирович, председатель совета директоров.

Соколов Дмитрий Владимирович, начальник светотехнической службы.

Старцев Андрей Юрьевич, научный сотрудник.

ЗАО "ЛИТ".

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44.

Тел. (495) 963-07-18, доб.1265. E-mail: vasiliev@npo.lit.ru.

Кудрявцев Николай Николаевич, ректор.

Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер. 9.

Тел. (495) 408-57-00.

Статья поступила в редакцию 29 октября 2009 г.

катодным падением напряжения, а электронов в анодный полупериод рабочего тока — анодным падением напряжения. В оптимальном температурном диапазоне ток термоэмиссии достаточен для поддержания разряда, а расход эмиссионного материала достаточно мал, что обеспечивает необходимое время жизни лампы. При понижении температуры электрода вследствие понижения тока разряда лампы ток термоэмиссии недостаточен, поэтому возрастает катодное падение потенциала, растет энергия ионов, выпадающих на катод, и растет распыление оксидного слоя. Если же температура электрода выше оптимальной, то происходит испарение оксида и, соответственно, увеличивается его расход. Анодное падение напряжения также зависит от тока разряда. Температура электродов в лампах дугового разряда низкого давления определяется нагревом электродов током накала, током разряда и охлаждением за счет излучения, теплопереноса и эмиссии электронов в катодный полупериод.

При увеличении расхода оксидов на электроде простое увеличение привеса эмиссионного материала на электродах малоэффективно и, кроме того, приводит к выходу электрода из оптимального режима работы вследствие увеличения его массы и теплоемкости. Чтобы вернуть электрод в оптимальный рабочий режим, необходимо увеличить ток накала электродов так, чтобы катодное падение напряжения вернулось к прежнему уровню за счет увеличения тока термоэмиссии электрода, что важно в катодный полупериод рабочего тока лампы. При увеличении тока разряда до прежней величины ток накала электродов необходимо снова снижать. Это потребует изменения характеристик ЭПРА в целях получения возможности изменения тока накала электродов в данной ситуации. Чтобы рассчитать величину, на которую надо изменять ток накала электродов, необходимо знать характер воздействия плазмы на электроды в анодный и катодный полупериоды рабочего тока лампы. Характер воздействия плазмы на электроды в различные полупериоды рабочего тока можно определить, если известны величины катодного и анодного падений напряжений, поэтому для их определения необходимо разработать простые и надежные методы.

Цель данной работы — раздельное определение катодного и анодного падений напряжений в мощных амальгамных лампах низкого давления.

Определение приэлектродных падений напряжений

Известные методы измерения приэлектродных падений напряжений требуют изготовления специального электроразрядного устройства и явля-

ются контактными. Анодное и катодное падения напряжений можно определить, например, зондовым методом [6], который дает хорошие результаты, но для реализации этого метода потребуется изготовить лампу специальной конструкции, так как необходимо измерять потенциал плазмы относительно каждого из электродов лампы в нескольких точках газового разряда. Можно либо использовать подвижный зонд [7, 8], либо ввести несколько зондов непосредственно в область электродов лампы [9] и провести измерение потенциала плазмы относительно ближайшего электрода. Потребуется изготовить лампу сложной конструкции, так как катодное и анодное падения напряжений осуществляются в очень небольшом пространстве вблизи электродов лампы.

На результат оказывают влияние геометрические особенности колбы лампы и электрода. Для ламп, работающих от ЭПРА на переменном токе высокой частоты 30—50 кГц, существуют дополнительные сложности при определении данных параметров указанным методом, так как электроды служат катодом и анодом в течение катодного и анодного полупериодов рабочего тока, и конструкция зонда должна обеспечивать высокое временное разрешение. При этом плазма в области зонда не успевает стабилизироваться в течение полупериода рабочего тока, что будет давать дополнительную погрешность. Наконец, в работах [1, 10] утверждается, что в люминесцентных лампах низкого давления, работающих при малых токах (20 мА) высокой частоты (30—50 кГц), анодным падением напряжения вообще можно пренебречь. Катодное падение напряжения в этом случае можно определить, если измерить суммарное (катодное + анодное) падение напряжений, приняв анодное падение напряжение равным нулю.

В данной работе для определения катодного и суммарного (катодного + анодного) падений напряжений использовались два независимых метода. Исследовалась амальгамная лампа с внутренним диаметром колбы 25 мм, током разряда 3,2 А, погонной электрической мощностью 2,4 Вт/см, при давлении смеси газов 60%Ag:40%Ne ~130 Па. Токи разряда и накала лампы стабилизированы, пределы их возможных колебаний — 0,1 А. Частота тока разряда — 43 кГц. Падение напряжения на лампе, токи разряда и накала измеряли с помощью анализатора мощности YOKOGAWA PZ 4000 с погрешностью 0,5 %.

Определение катодного падения напряжения

Падение напряжения на лампе равно сумме анодного и катодного падений напряжений и падения напряжения на положительном столбе раз-

ряда. Для определения катодного падения напряжения измерялось рабочее напряжение на лампе при неизменном токе ее разряда и изменяемом токе накала электродов лампы. При увеличении тока накала электродов лампы увеличивался ток термоэмиссии электродов, из-за чего происходило уменьшение катодного падения напряжения в лампе (на другие составляющие падения напряжения на лампе это не влияет), и, как следствие, уменьшение падения напряжения на лампе в целом. Ток накала электродов изменялся с шагом 0,1 А от минимального значения 0 А, при котором падение напряжения на лампе максимально, до максимального значения 6 А, при котором падение напряжения — минимально. В эксперименте при изменении тока накала на 0,1 А разряд горел при данном значении тока накала в течение 20 мин, затем измерялось значение падения напряжения на лампе.

В работе [10] был использован аналогичный метод определения катодного падения напряжения люминесцентных ламп малой мощности с током разряда 20 мА. Предполагали, что минимальное значение катодного падения напряжения не может быть менее $V_{k \min} = 5$ В — величины потенциала одноступенчатой ионизации ртути электронным ударом (буферные газы имеют еще большие потенциалы ионизации).

Учитывая изложенное выше, предположено следующее. Разность максимального и минимального падений напряжения на лампе равна разности катодных падений напряжения при этих измерениях. Разность максимального U_{\max} и минимального U_{\min} падений напряжения на лампе определяется экспериментально. Наименьшая возможная величина катодного падения напряжения равна 5 В, поэтому максимальное его значение (при минимальном значении тока накала электродов) можно определить из выражения (аналогично из работы [10]):

$$V_{k \max} = (U_{\max} - U_{\min} + 5). \quad (1)$$

Такой способ определения катодного падения напряжения можно применить не только для его максимальной величины при минимальном токе накала электродов, но и для всех значений тока накала, находящихся между минимальным и максимальным значениями тока накала, определяющих, соответственно, максимальное и минимальное катодные падения напряжения. В этом случае текущее значение катодного падения можно найти из выражения

$$V_k = (U - U_{\min} + 5), \quad (2)$$

где U — падение напряжения на лампе, соответствующее определенному току ее накала. Естественно, что $U \geq U_{\min}$.

Зависимость падения напряжения на лампе U от тока накала электродов I в стационарном режиме работы приведена на рис. 1. Минимальное значение падения напряжения на лампе, достигаемое при величине тока накала электродов 6 А, остается далее практически неизменным при дальнейшем увеличении тока накала электродов.

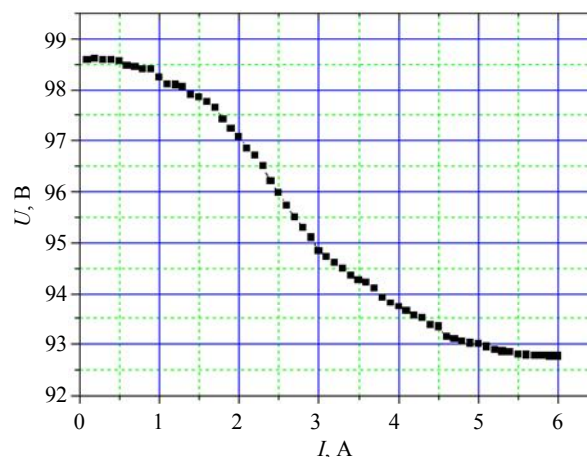


Рис. 1. Зависимость падения напряжения на лампе U от тока накала электродов I в стационарном режиме работы лампы

Причина существования эффекта насыщения при низких значениях величины катодного падения напряжения (при больших величинах тока накала электрода) заключается в следующем. Увеличение тока накала электродов лампы приводит к увеличению тока термоэмиссии электродов, что обуславливает снижение величины катодного падения напряжения, но при достижении тока накала электродов величины около 6 А дальнейшее снижение величины катодного падения невозможно в силу достижения им минимального значения. При высоких значениях величины катодного падения напряжения, наблюдаемого при малых токах накала электродов, также имеет место насыщение, по-видимому связанное с тем, что при этом ток термоэмиссии электродов близок к минимальному и определяется главным образом катодным пятном.

Из рис. 1 видно, что $U_{\max} = 98,6$ В при $I = 0$, $U_{\min} = 92,8$ В при $I = 6$ А (указаны действующие значения напряжений на лампе). Подставляя в (1) разницу между максимальным и минимальным действующими значениями напряжения на лампе, получим, что $V_{k \max} = 5,8 + 5 = 10,8$ В. Эксперимент повторялся 5 раз и давал близкие результаты. В работе приведены усредненные данные по этим результатам.

Приведенный метод позволяет определить все текущие катодные падения напряжения (2), лежащие в диапазоне между максимальным и минимальным катодными падениями напряжения.

Определение суммарного и анодного падений напряжений на электродах лампы

Суммарное падение напряжений (анодное + катодное) определялось “линейным” методом. Для этого были изготовлены десять ламп с одинаковыми по конструкции электродами, но отличались длиной. Пять ламп имели длину межэлектродного промежутка $L_1 = 1450$ мм, а пять были с меньшей длиной межэлектродного промежутка $L_2 = 1075$ мм. На лампах было измерено падение напряжения, среднее значение напряжения на длинной лампе $U_1 = 98,6$ В, на короткой — $U_2 = 76,5$ В (действующие значения напряжений). Ток накала в обоих случаях отсутствует. Используя то обстоятельство, что падение напряжения на обеих лампах складывается из падения напряжения на положительном столбе дугового разряда, катодного и анодного падений напряжения, и считая, что падение напряжения на положительном столбе разряда линейно зависит от длины разрядного промежутка, можно записать следующее:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{+1} + V_t; \\ U_2 &= U_{+2} + V_t; \\ U_{+1}/U_{+2} &= L_1/L_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где U_1, U_{+1}, L_1 — соответственно, падение напряжения на длинной лампе, на положительном столбе дугового разряда этой лампы и длина разрядного промежутка длинной лампы;

U_2, U_{+2}, L_2 — аналогичные параметры короткой лампы;

$V_t = V_a + V_k$ — суммарное (катодное V_k + анодное V_a падения напряжения) падение напряжения на каждой из ламп.

Катодное и анодное падения напряжений считаем одинаковыми в обеих лампах. Решая систему уравнений (3), получим выражение для суммарного приэлектродного падения напряжений V_t в лампе:

$$V_t = (L_1 U_2 - L_2 U_1) / (L_1 - L_2). \quad (4)$$

Подставляя в (4) соответствующие значения измеренных электрических и геометрических параметров ламп, получим, что суммарное приэлектродное падение напряжений (анодное + катодное) равно 13,2 В.

Определенное из (1) и (4) катодное падение напряжения составляет 10,8 В, а суммарное падение, т. е. катодное + анодное падения напряжений, на электродах лампы составляет 13,2 В. Отсюда следует, что анодное падение напряжения можно вычислить из выражения

$$V_a = V_t - V_k. \quad (5)$$

Отсюда для максимального значения катодного падения, определяемого из соотношения (1) и равного $V_{k \max} = 10,8$ В, получим величину анодного падения напряжения $V_a = 2,4$ В (5).

Анодное и катодное падения напряжений также были определены для нескольких промежуточных значений тока накала электродов. Для токов накала электродов 3 и 5 А измеренное катодное падение напряжения — 7,2 и 5,2 В, соответственно, анодное падение напряжения — 2,4 В для обоих случаев, т. е. оно не зависит от тока накала электродов. Эти данные дополнительно подтверждают корректность измерений.

Полученное значение максимального катодного падения напряжения отличается от значений, приведенных в работе [10], где при увеличении тока накала электродов лампы катодное падение уменьшается с 20 до 5 В. Кроме того, в работах [1, 10] анодным падением напряжения пренебрегают при частоте рабочего тока свыше 1 кГц. Электрическая мощность люминесцентных ламп, исследовавшихся в работе [1], около 40 Вт, в [10] — 32 Вт, давление буферных газов в лампе с наполнением 60%Ar:40%Ne составляло около 3,5 Торр (466 Па). Такие значения текущих катодных падений напряжений, определенных в работе [10], могут свидетельствовать о том, что небольшой ток разряда, равный 20 мА, не в состоянии разогреть электрод лампы, так как электрод слишком массивен для такого тока разряда. Другой возможной причиной более высоких катодных падений напряжений может явиться недостаточная обработка карбонатной смеси на электродах лампы при ее изготовлении или иной ее состав, чем в нашем случае. Кроме того, данная лампа имеет электродный узел другой конструкции. Возможно также, что такие значения текущих катодных падений являются следствием комбинации этих причин.

В мощной амальгамной лампе низкого давления анодное падение вносит гораздо больший вклад в нагревание электрода, чем катодное падение, так как электронный ток на электрод гораздо больше ионного тока в соответствующие полупериоды. Особенно это заметно при расчетах температурных режимов защитных экранов [5], применяемых в специальных электродных узлах амальгамных ламп низкого давления. Для защитного экрана электродного узла, приведенного на рис. 2, температуру на единицу площади экрана можно оценить из следующего соотношения:

$$0,5(cI_+ V_k + I_- V_a) S + F_p = S \epsilon \sigma T^4 + F_g + F_s, \quad (6)$$

где $c \approx 0,3$ — доля ионов, выпадающая на экран, представляющий собой танталовую пластинку, закрепленную на арматуре электрода напротив торца

спирали электрода, ориентированной в сторону плазмы, которая определяется как отношение площади экрана к общей площади экрана и триспирального электрода (для оценки считая его цилиндрическим и сплошным);

I_+ и I_- — соответственно, плотности ионного и электронного токов на электрод в соответствующие полупериоды рабочего тока лампы;

V_k и V_a — катодное и анодное падения напряжения на электродах лампы в соответствующие полупериоды рабочего тока лампы;

ε — степень серости экрана;

σ — постоянная Стефана—Больцмана;

T — температура экрана;

S — его площадь;

F_g — потери тепла от экрана через газ;

F_s — потери тепла через поддержки экрана;

F_p — нагрев излучением плазмы.



Рис. 2. Внешний вид потенциального защитного экрана с танталовой пластинкой, ориентированной в сторону плазмы

При данной оценке температуры экрана считается, что основная часть тепловой энергии экрана передается в окружающую среду посредством излучения.

Сравним члены cI_+V_kS и I_-V_aS в левой части уравнения (6), определяющие нагрев экрана, соответственно, в катодный и анодный полупериоды рабочего тока лампы. I_-S — полный электронный ток в анодный полупериод рабочего тока лампы, практически равный току лампы 3,2 А. Площадь экрана S диаметром 1 см равна 0,78 см², плотность ионного тока определяется формулой Бома [11]:

$$I_+ = 0,36en_i(2kT_e/M_i)^{1/2}, \quad (7)$$

где e — заряд электрона;

$n_i = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³ — концентрация ионов в плазме положительного столба разряда;

$T_e = 1,8$ эВ — температура электронов в плазме положительного столба разряда;

k — постоянная Больцмана;

M_i — масса иона ртути.

Концентрации электронов и ионов $n_i = n_e$ и температура электронов были определены экспериментально зондовым методом. Используя (7), находим, что энерговклад в катодный полупериод равен 0,38 Вт, а в анодный — 7,68 Вт. Следовательно, вклад анодного падения напряжения в разогрев экрана значительно больше, чем катодного падения. Во время работы лампы экран грелся. Температура этого экрана в связи с затруднениями пирометрических измерений (температура экрана недостаточно велика и мешает горящий разряд) оценивалась визуально. Цвет нагретого экрана коричнево-красный, что соответствует температурному диапазону нагретого металла примерно 850—920 К. Температура экрана, оцененная с помощью (6), составила около 930 К. Таким образом, расчетные и экспериментальные результаты для температуры экрана хорошо совпадают.

Заключение

В данной работе впервые определены катодное и анодное падения напряжения в мощных амальгамных лампах низкого давления с рабочим током разряда 3,2 А на частоте 43 кГц, с погонной электрической мощностью 2,4 Вт/см. Катодное падение определено способом, использующим изменение падения напряжения на электродах лампы при изменении тока накала ее электродов в стационарном режиме работы. Другим независимым способом определено суммарное (катодное + анодное) падение напряжения на электродах лампы. Получено, что в отличие от предположений, что в лампах малой мощности на переменном токе с частотой более 1 кГц анодное падение равно нулю, в мощных амальгамных лампах анодное падение составило 2,4 В. Максимальное катодное падение напряжения равно 10,8 В. Определены промежуточные катодные падения напряжения при токе накала электродов 3 и 5 А, которые равны 7,2 и 5,2 В, соответственно. Анодные падения напряжения в обоих случаях одинаковы и равны 2,4 В, так как анодное падение напряжения не зависит от тока накала электродов. Показано, что полученная величина анодного падения дает основной вклад в разогрев электрода, и ее надо учитывать при конструировании ЭПРА и электродных узлов мощных амальгамных ламп низкого давления, работающих на токах с частотой 1—100 кГц.

Л и т е р а т у р а

1. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. — М.: Энергия, 1977.
2. Васильев А. И., Василяк Л. М., Костюченко С. С., Кудрявцев Н. Н., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. // Светотехника. 2009. № 3.
3. Bhattacharya A. K. // J. Appl. Phys. 15 June 1989. No. 65 (12). P. 4595—4602.
4. Bhattacharya A. K. // Ibid. P. 4603—4607.
5. Васильев А. И., Василяк Л. М., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Микаева С. А., Соколов Д. В., Старцев А. Ю. // Инженерная физика. 2009. № 1. С. 25—31.
6. Watanabe Y., Murayama S. // Japan. J. Appl. Phys. 1993. No. 32. P. 3593—3600.
7. Недоспасов А. В. // ЖЭТФ. 1958. № 34. С. 1338.
8. Waymouth J. F. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. P. 1404.
9. Hammer E. E. // J. IES winter. 1995. P. 116—122.
10. Hilscher A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 1707—1715.
11. Раизер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.

Determination of the cathode and anode voltage drop in high power low pressure amalgam lamps

L. M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 13/2 Izhorskaya str.,
Moscow, 127412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

A. I. Vasiliev, S. V. Kostyuchenco, D. V. Sokolov, A. J. Startsev

Joint Stock Company NPO LIT, 44, Krasnobogatyrechkaya str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: vasiliev@npo.lit.ru

N. N. Kudryavtsev

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institute al., Dolgoprudny,
Moscow reg., 141700, Russia

Cathode and anode drop of powerful low pressure amalgam lamps were measured. The lamp discharge current is 3.2 A, discharge current frequency is 43 kHz, linear electric power is 2.4 W/cm. The method of determination of a cathode drop is based on the change of lamp operating voltage at variation of the electrode heating current at constant discharge current. The total (cathode plus anode) drop of voltage was measured by other, independent way. The maximum cathode fall is 10.8 V, the anode fall corresponding to the maximal cathode fall is 2.4 V. It is shown that in powerful low pressure amalgam lamps the anode fall gives considerable, and in certain cases the basic contribution to heating of electrodes, therefore the anode fall cannot be neglected at design an electrode and ballast of amalgam lamps with operating discharge current frequency of tens kHz.

PACS: 52.25.-b

Keywords: arc discharge, UV radiation, amalgam lamp, water disinfection.

Bibliography — 11 references.

Received 29 October 2009