

УДК 537.533

## Исследование характеристик асимметричных осветительных ламп трансформаторного типа

О.А. Попов, А.Е. Атаев

**Попов Олег Алексеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: olegpopov734@yahoo.com

**Атаев Артем Еремович** — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Проведено экспериментальное исследование электрических и излучательных характеристик индукционной асимметричной лампы трансформаторного типа, в которой высокочастотный индуктор, состоящий из кольцевого ферромагнитного магнитопровода и четырехвитковой индуктивной катушки, размещался на одном конце замкнутой разрядной трубки. Разряд в форме замкнутого плазменного шнура длиной  $\Lambda_{pl} = 940$  мм зажигался в трубке диаметром 60 мм на частоте  $f = 135$  кГц и мощности  $P = 70 \dots 130$  Вт в смеси паров ртути (0,0075 мм рт. ст.) и криптона (0,3 и 0,5 мм рт. ст.). Установлено, что мощность потерь в магнитопроводе индуктора  $P_c$  уменьшается с увеличением мощности плазмы  $P_{pl}$  и площади сечения магнитопровода  $S_{fer}$ . КПД индуктора  $\eta_c = 1 - P_c/P$  возрастал с увеличением мощности лампы и сечения магнитопровода, асимптотически стремясь к единице. Световая отдача плазмы  $\eta_{pl}$  уменьшалась с увеличением мощности плазмы от 111 лм/Вт ( $P_{pl} = 60$  Вт) до 101 лм/Вт ( $P_{pl} = 120$  Вт) со скоростью  $d\eta_{pl}/dP_{pl}$ , возрастающей с увеличением давления криптона. Зависимость световой отдачи лампы  $\eta_l = \eta_c \eta_{pl}$  от мощности лампы  $P$  имеет максимум, сдвигающийся в сторону меньших мощностей с увеличением площади сечения магнитопровода  $S_{fer}$  и давления криптона  $p_{Kr}$ .

*Ключевые слова:* лампа трансформаторного типа, ртутная плазма низкого давления, асимметричный высокочастотный индуктор, световые отдачи плазмы и лампы.

## Studying the Performance Characteristics of Asymmetrical Electrodeless Induction Lamps

О.А. Попов, А.Е. Атаев

**Popov Oleg A.** — Dr.Sci. (Techn.), professor of Lighting Engineering, MPEI, e-mail: olegpopov734@yahoo.com

**Ataev Artem E.** — Dr.Sci. (Techn.), professor of Lighting Engineering, MPEI

The electrical and photometrical characteristics of an asymmetrical electrodeless induction (transformer-type) lamp the high-frequency inductor (RF coupler) of which, consisting of a circular ferromagnetic core and a four-turn induction coil, is placed at one end of a closed-loop discharge tube, are studied. The discharge, having the shape of a closed plasma filament with the length  $\Lambda_{pl} = 940$  mm, was ignited in a tube 60 mm in diameter at a frequency of 135 kHz and power  $P = 70\text{--}130$  W in a mixture of mercury vapor (0.0075 Torr) and krypton (0.3 and 0.5 Torr). It is found that the power loss in the inductor core  $P_c$  decreases with increasing the plasma power  $P_{pl}$  and the core cross section  $S_{fer}$ . The inductor efficiency  $\eta_c = 1 - P_c/P$  increased, asymptotically tending to unity, as the lamp power and core cross section were increased. As the plasma power  $P_{pl}$  increased, its luminous efficacy  $\eta_{pl}$  decreased from 111 lm/W (at  $P_{pl} = 60$  W) to 101 lm/W (at  $P_{pl} = 120$  W) at a rate  $d\eta_{pl}/dP_{pl}$  increasing with a growth of krypton pressure. The lamp efficacy  $\eta_l = \eta_c \eta_{pl}$  as a function of lamp power  $P$  was found to have a maximum, which shifts toward lower values of lamp power with increasing the core cross section  $S_{fer}$  and krypton pressure  $p_{Kr}$ .

*Key words:* electrodeless transformer-type lamp, low-pressure mercury plasma, asymmetrical RF coupler, lamp and plasma efficacies.

## Введение

С конца XX в. индукционные разрядные ртутные лампы трансформаторного типа (ЛТТ) низкого давления, работающие на частотах 100...400 кГц, широко применяются для внутреннего и внешнего освещения и как источники ультрафиолетового (УФ) излучения, используемого для очистки воды и воздуха и в некоторых технологических процессах [1—3]. Стандартная ЛТТ с замкнутой разрядной трубкой имеет симметричную конструкцию, в которой кольцевые ферромагнитные магнитопроводы высокочастотного (ВЧ) индуктора размещены на двух противоположных концах разрядной трубки. В некоторых излучательных и осветительных установках желательное использование светильников с лампами трансформаторного типа асимметричной конструкции, где магнитопровод расположен на одном конце замкнутой разрядной трубки. К сожалению, публикации по исследованию характеристик асимметричных ЛТТ отсутствуют.

## Конструкция лампы и экспериментальная установка

На рис. 1 приведен эскиз асимметричной лампы трансформаторного типа, состоящей из двух цилиндрических стеклянных трубок с внешним диаметром  $OD_t = 60$  мм и длиной  $L_t = 264$  мм и двух соединительных трубок длиной  $L_1 = 60$  мм и  $L_2 = 170$  мм и внешним диаметром  $OD_1 = 38$  мм. Индуктивная катушка (многожильный провод 19 жил, 4 витка) служит первичной обмоткой магнитопровода, составленного из нескольких ферромагнитных (MnZn) колец, каждое с внешним и внутренним диаметром  $OD_{fer} = 56$  мм и  $ID_{fer} = 42$  мм и высотой  $h_{fer} = 13$  мм. Вторичной обмоткой служит замкнутый плазменный шнур индукционного разряда длиной  $\Lambda_{pl} = 940$  мм, сформировавшийся вдоль центральной осевой линии замкнутой разрядной трубки.

Давление паров ртути в трубке поддерживается температурой расположенной в штенгеле амальгамы при давлении  $p_{Hg} = 7,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., при котором достигается максимальный КПД ультрафиолетового излучения ртутной плазмы на длине волны 254 нм. Значения давления буферного газа (криптона)  $p_{Kr} = 0,3$  и  $p_{Kr} = 0,5$  мм рт. ст. выбираются также из соображений максимальной эффективности генерации УФ излучения ( $\lambda = 254$  нм), достигаемых в симметричных лампах трансформаторного типа с разрядными трубками диаметром 4...6 см, работающих на мощностях  $\sim 100$  Вт [1]. Лампа работает на частоте  $f = 135$  кГц, лежащей в «разрешенном» диапазоне частот 100...400 кГц. Потребляемая лампой ВЧ мощность изменяется в интервале  $P = 50...130$  Вт. Внутренняя поверхность стенок разрядной трубки покрыта защитной прозрачной пленкой, на которую нанесена смесь трех узкополосных люминофоров, определяющих цветовую температуру лампы  $T_{цв} = 4000$  К и общий индекс цветопередачи  $R_a = 78$  [1, 2].

Схема питания лампы трансформаторного типа и измерения ее электрических и излучательных характеристик приведена в [2]. Синусоидальное ВЧ напряжение от задающего генератора напряжения (PM 5193, Philips) подается на широкополосный усилитель (1140LA, ENI), усиливающий ВЧ сигналы частотой от 10 кГц до 30 МГц, напряжением до 2 кВ и мощностью до 2 кВт. От усилителя сигнал подается на измеритель мощности Z4000 (Yokogawa) и далее — на согласующее устройство, соединенное с индуктивной катушкой ВЧ индуктора лампы. Измерится потребляемая лампой мощность  $P$  и мощность потерь в ВЧ индукторе  $P_c$ . Поглощаемая плазмой мощность  $P_{pl}$  определяется как разность между  $P$  и  $P_c$ , поскольку рассеиваемая на частоте ВЧ индуктором мощность электромагнитного излучения на частоте 135 кГц пренебрежимо мала. Измерения светового потока лампы  $\Phi_v$  проводятся с помощью компьютеризованного фотометрического шара [2].

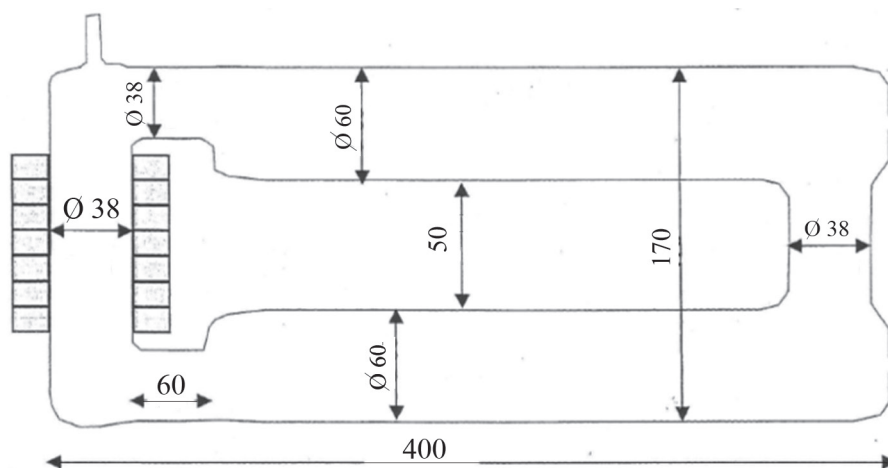


Рис. 1. Эскиз лампы трансформаторного типа с асимметричным размещением магнитопровода ( $D_t = 60$  мм,  $L = 400$  мм,  $H_1 = 170$  мм)

**Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение**

Мощность потерь в ВЧ индукторе  $P_c$  лампы трансформаторного типа складывается из мощности потерь в магнитопроводе  $P_{fer}$  и мощности потерь в проводе катушки  $P_{coil}$ . Как показали результаты экспериментальных исследований ламп трансформаторного типа, работающих на частотах  $f > 50$  кГц и мощностях  $P > 50$  Вт, мощность потерь в магнитопроводе  $P_{fer} \gg P_{coil}$ , потому можно принять  $P_c \approx P_{fer}$  [1, 3].

На рис. 2 приведены экспериментальные значения мощности потерь в ВЧ индукторе асимметричной лампы  $P_c$ , измеренные при различных мощностях лампы  $P$  с магнитопроводами с разной площадью сечения  $S_{fer} = 8,1$  и  $12,5$  см<sup>2</sup>. Видно, что  $P_c$  уменьшается с увеличением мощности лампы  $P$  и площади сечения магнитопровода  $S_{fer}$ . Отметим, что характер зависимости  $P_c$  от  $P$  и значения  $P_c$  практически такие же, как в симметричной ЛТТ с двумя магнитопроводами с такими же сечениями и с такими же конструктивными параметрами разрядной трубки, работавшей на такой же частоте  $f = 135$  кГц [3].

Уменьшение мощности потерь в ВЧ индукторе  $P_c$  (фактически  $P_{fer}$ ) вызывает рост КПД индуктора  $\eta_c$  [1, 3]:

$$\eta_c = 1 - (P_c/P) \approx 1 - (P_{fer}/P) = (P - P_{fer})/P = P_{pl}/P. \quad (1)$$

Нетрудно видеть из (1), что с увеличением мощности лампы КПД индуктора  $\eta_c$  асимптотически стремится к единице. Причина уменьшения мощности потерь в ВЧ индукторе и возрастания его КПД та же, что и в симметричных ЛТТ: снижение напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $E_{pl}$ . В результате снижается ВЧ напряжение на плазменном витке  $U_{pl} = E_{pl} \Lambda_{pl}$  а с ним — ВЧ напряжение на катушке ВЧ индуктора  $U_c = U_{pl} N$  [1, 3]. Последнее вызывает уменьшение мощности потерь в магнитопроводе  $P_{fer}$  в соответствии с соотношением [3]:

$$P_{fer} = 486(E_{pl} \Lambda_{pl})^{2,63} (ID_{fer} + L_{fer}) / f(H_{fer} L_{fer})^{1,63}, \quad (2)$$

где  $L_{fer} = (OD_{fer} - ID_{fer})/2$  — толщина стенки магнитопровода;  $H_{fer}$  — высота магнитопровода.

Экспериментальные зависимости световой отдачи лампы  $\eta_v = \Phi_v/P$  от мощности лампы  $P$ , полученные при давлении  $p_{Kr} = 0,5$  мм рт. ст. с магнитопроводами разного сечения  $S_{fer} = 8,1$  и  $12,5$  см<sup>2</sup>, приведены на рис. 3. Зависимости  $\eta_v$  от  $P$ , измеренные в той же лампе с магнитопроводом сечением  $S_{fer} = 8,1$  см<sup>2</sup>, но при различных давлениях криптона  $p_{Kr} = 0,3$  и  $p_{Kr} = 0,5$  мм рт. ст., приведены на рис. 4. Видно, что зависимости  $\eta_v$  от  $P$  имеют максимум, положение которого сдвигается в сторону меньших мощностей лампы при увеличении

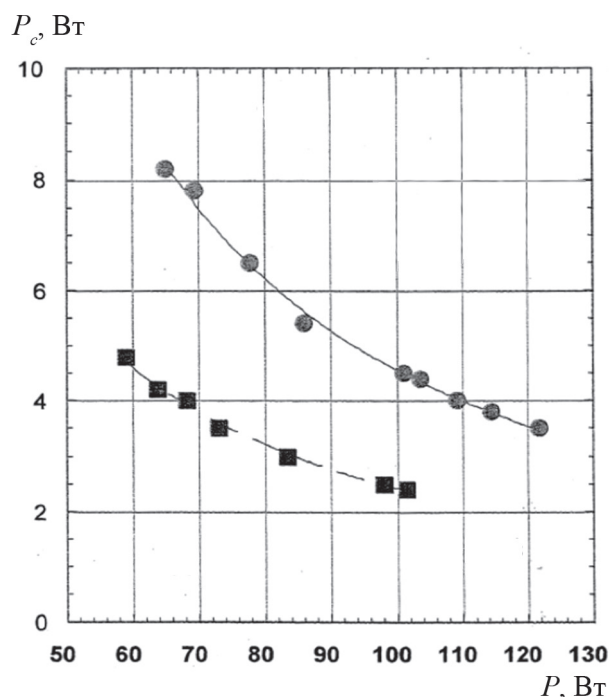


Рис. 2. Зависимость потерь мощности в магнитопроводе  $P_c$  от мощности лампы  $P$ . Давление криптона  $p_{Kr} = 0,5$  мм рт. ст.; частота ВЧ поля  $f = 135$  кГц; площадь сечения магнитопровода  $S_{fer}$ :

8,1 см<sup>2</sup> (●); 12,5 см<sup>2</sup> (■)

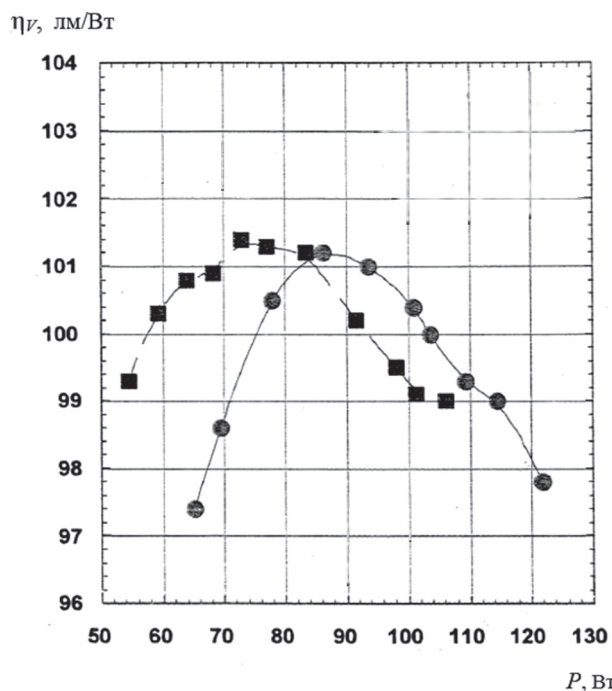


Рис. 3. Зависимость световой отдачи лампы  $\eta_v$  от мощности лампы  $P$  (параметры лампы и обозначения — как на рис. 2)

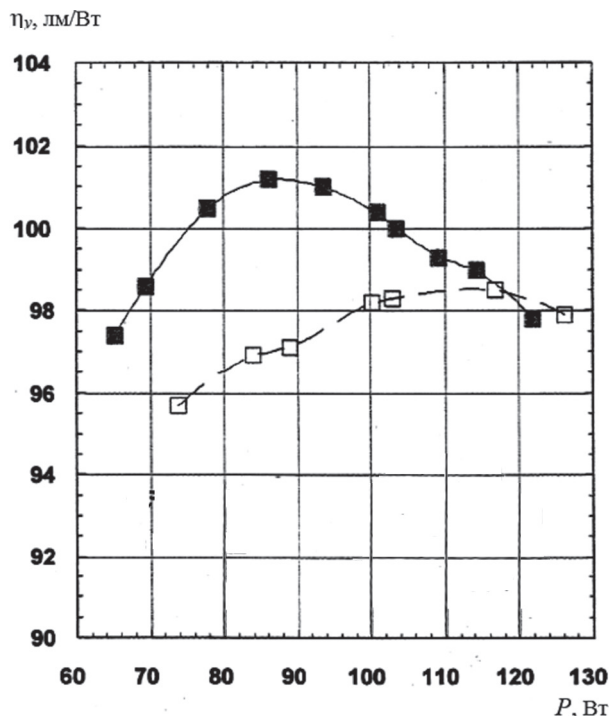


Рис. 4. Зависимость световой отдачи лампы  $\eta_v$  от мощности лампы  $P$ . Частота ВЧ поля  $f = 135$  кГц, площадь сечения магнитопровода  $S_{fer} = 8,1$  см<sup>2</sup>; давление криптона  $p_{Kr}$ : 0,3 мм рт. ст. (□); 0,5 мм рт. ст. (■)

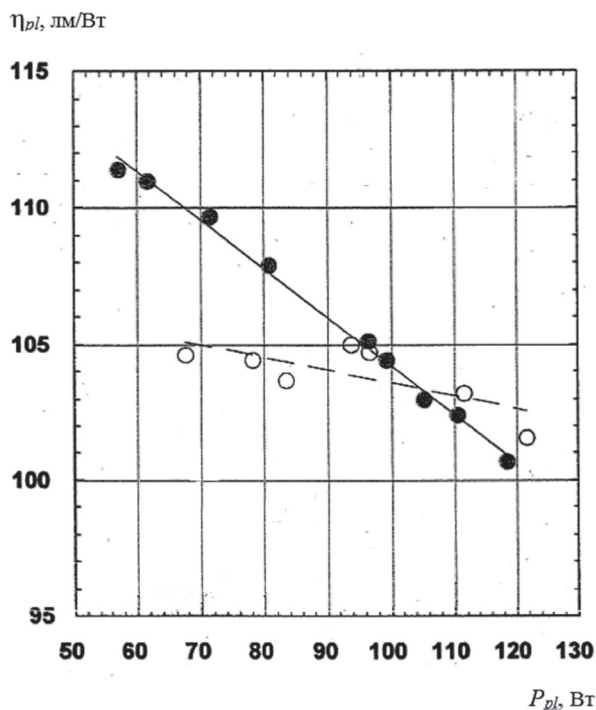


Рис. 5. Зависимость световой отдачи плазмы  $\eta_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$  (параметры лампы и обозначения — как на рис. 4)

площади сечения магнитопровода и давления инертного газа (криптона).

Возникновение максимума становится понятным, если выразить световую отдачу лампы  $\eta_v$  как произведение КПД индуктора  $\eta_c$  и световой отдачи плазмы  $\eta_{pl}$ , которая определяется как [1]:

$$\eta_{pl} = \Phi_v / P_{pl} \quad (3)$$

Из (1) и (3) следует выражение для световой отдачи лампы  $\eta_v$  как произведения  $\eta_c$  на  $\eta_{pl}$  [1, 3]:

$$\eta_v = \Phi_v / P = \eta_c \eta_{pl} \quad (4)$$

Из (4) видно, что зависимость  $\eta_v$  от  $P$  определяется зависимостью КПД индуктора  $\eta_c$  от мощности лампы  $P$  и зависимостью световой отдачи плазмы  $\eta_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ . Последняя приведена на рис. 5 для ЛТТ с магнитопроводом сечением  $S_{fer} = 8,1$  см<sup>2</sup> для двух давлений криптона: 0,3 и 0,5 мм рт. ст. Видно, что во всем интервале  $P_{pl}$  световая отдача плазмы уменьшается с увеличением мощности плазмы с постоянной «скоростью»  $B = d\eta_{pl} / dP_{pl}$ , возрастающей с увеличением давления криптона от 0,12 лм/Вт<sup>2</sup> ( $p_{Kr} = 0,3$  мм рт. ст.) до 0,2 лм/Вт<sup>2</sup> ( $p_{Kr} = 0,5$  мм рт. ст.). Такие же «скорости» уменьшения световой отдачи плазмы наблюдались в симметричных ЛТТ с такими же разрядными трубками, работающими на той же частоте 135 кГц и с такими же удельными мощностями плазмы [1].

Сдвиг максимума в зависимости  $\eta_v$  от  $P$  в сторону меньших мощностей лампы с увеличением сечения магнитопровода связан с уменьшением мощности потерь в магнитопроводе и, следовательно, с увеличением КПД индуктора  $\eta_c$  [3]. Повышение давления криптона также сдвигает максимум в зависимости  $\eta_v$  от  $P$  в сторону меньших мощностей лампы (плазмы), вследствие того, что с ростом  $p_{Kr}$  падает напряженность ВЧ электрического поля плазмы  $E_{pl}$ . А поскольку в соответствии с (2) мощность потерь в магнитопроводе  $P_{fer} \sim E_{pl}^{2,6}$  [1, 3], то со снижением напряженности ВЧ электрического поля уменьшается  $P_{fer}$  и, соответственно, возрастает КПД индуктора  $\eta_c$ .

## Закключение

Таким образом, экспериментально установлено, что асимметричные ЛТТ имеют высокие значения световой отдачи, а также практически такие же энергетические и светотехнические характеристики, как и симметричные ЛТТ. Они могут применяться для общего освещения и как источники УФ излучения в системах очистки воды и воздуха, конструкция которых не позволяет использовать симметричные лампы трансформаторного типа.

---

**Литература**

---

1. **Попов О.А.** Исследование влияния давления инертного газа на характеристики индукционных люминесцентных ламп // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 76—84.

2. **Попов О.А., Чандлер Р.Т.** Индуктивный источник света трансформаторного типа на частотах 150—400 кГц мощностью 200—500 Вт // Теплофизика высоких температур. 2007. № 4. С. 795—800.

3. **Попов О.А., Агаев А.Е.** Влияние конструктивных параметров разрядной трубки и магнитопровода на мощность потерь в высокочастотном индукторе лампы трансформаторного типа // Вестник МЭИ. 2014. № 4. С. 66—70.

---

**References**

---

1. **Popov O.A.** Issledovanie Vlijaniya Davlenija Inertnogo Gaza na Harakteristiki Indukcionnyh Ljuminescentnyh Lamp. Vestnik MPEI. 2013;3:76—84. (in Russian).

2. **Popov O.A., Chandler R.T.** Induktivnyj Istochnik Sveta Transformatornogo Tipa Na Chastotah 150—400 Kg s Moshhnost'ju 200—500 Vt. Teplofizika vysokih temperatur. 2007;4:795—800. (in Russian).

3. **Popov O.A., Agaev A.E.** Vlijanie Konstruktivnyh Parametrov Razrjadnoj Trubki i Magnitoprovoda na Moshhnost' Poter' v Vysokochastotnom Induktore Lampy Transformatornogo Tipa. Vestnik MPEI. 2014;4:66—70. (in Russian).

*Статья поступила в редакцию 04.03.2016*