

# Мощность потерь в индукторе бесферритных индукционных ртутных ламп НД с замкнутой разрядной трубкой

Е.В. ЛОВЛЯ, О.А. ПОПОВ \*

НИУ «МЭИ», Москва

\* E-mail: popovoleg445@yahoo.com

## Аннотация

В рамках трансформаторной модели проведены оценки мощности потерь в ВЧ индукторе бесферритной индукционной лампы НД с замкнутой разрядной диэлектрической трубкой внутреннего диаметра 16, 25 и 38 мм при частоте ВЧ поля 1,7, 3,4 и 5,1 МГц и мощности плазмы разряда 25–500 Вт. Разряд возбуждался в смеси паров ртути (давление около  $7,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) и аргона (давление 0,1, 0,3 и 1,0 мм рт. ст.) с помощью катушки индуктивности с числом витков 3, 4 и 6, размещённой по «внутреннему» периметру указанной трубки. Установлено, что зависимость мощности потерь в проводе катушки ( $P_{\text{coil}}$ ) от мощности плазмы разряда имеет минимум и что  $P_{\text{coil}}$  падает с ростом частоты ВЧ поля, диаметра разрядной трубки и числа витков катушки индуктивности и слабо зависит от давления аргона. Результаты расчёта находятся в удовлетворительном качественном согласии с экспериментальными, а расхождения объясняются неучётом в модели разряда скин-эффекта и радиальной неоднородности напряжённости электрического поля.

**Ключевые слова:** индукционный разряд, замкнутая разрядная трубка, разрядная плазма, НД, катушка индуктивности, мощность потерь.

## Введение

Плазма бесферритных индукционных разрядов, возбуждаемых в смеси паров ртути и инертных газов НД в замкнутых кварцевых трубках, – перспективный источник УФ излучения [1, 2]. Из-за отсутствия внутренних электродов индукционные УФ лампы могут работать при низких давлениях буферного инертного газа (0,1–0,5 мм рт. ст.), наиболее эффективных для генерации УФ резонансного излучения ртутной плазмы НД [3].

Поскольку в бесферритном индукционном разряде НД, возбуждаемом на частоте  $f < 10$  МГц, электромагнитное излучение ничтожно мало [4], то потребляемая лампой мощность  $P_{\text{lamp}}$  складывается из поглощаемой плазмой разряда мощности  $P_{\text{pl}}$  и мощности потерь в проводе катушки  $P_{\text{coil}}$  [5, 6]. Из этого следует, что для получения энергоэффективных индукционных УФ ламп следует максимизировать КПД катушки индуктивности  $\eta_{\text{coil}} (= 1 - P_{\text{coil}}/P_{\text{lamp}})$  [1], т.е. минимизировать  $P_{\text{coil}}$ .

В настоящей работе с использованием трансформаторной модели индукционного разряда НД [5, 6] исследовалось влияние на  $P_{\text{coil}}$  конструктивных параметров замкнутой разрядной трубки (её диаметра и давления буферного инертного газа), числа витков катушки  $N$ ,  $f$  и  $P_{\text{pl}}$ .

## Конструкции разрядной трубки и ВЧ индуктора

Расчёты проводились для ламп длиной ( $l_{\text{lamp}}$ ) 406, 426 и 454 мм и шириной ( $H_{\text{lamp}}$ ) 106, 126 и 154 мм соответственно, имеющих: разрядную трубку с внутренним диаметром ( $d_t$ ) 16, 25 и 38 мм и толщиной стенки ( $\Delta$ ) 1,0, 1,5 и 2,0 мм соответственно; катушку индуктивности из многожильного медного провода (литцендрат) диаметром ( $d_w$ ) 1,63 мм с удельным погонным сопротивлением ( $\rho_w$ )  $8,5 \cdot 10^{-4}$

Ом/см (при  $f = 2\text{--}5$  МГц) и  $N = 3, 4$  и 6, размещённую по «внутреннему» периметру лампы с длиной каждой «длинной» ( $l_{\text{per}}$ ) и каждой «короткой» ( $H_{\text{per}}$ ) его сторон 370 и 70 мм соответственно (рис. 1). При этом: а) давление паров ртути в трубке принималось оптимальным (по максимуму потока резонансного излучения): порядка  $7,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., а давление инертного газа (аргон) – равным 0,1, 0,3 и 1,0 мм рт. ст.; б) значения  $f$  выбирались из условия  $\omega \ll \nu_e$  (где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота ВЧ поля,  $\nu_e$  – частота упругих соударений в плазме электронов с атомами ртути и инертного газа), при котором можно пренебречь реактивной (индуктивной) составляющей напряжённости ВЧ электрического поля в плазме  $E_{\text{pl}}$ ; в) принималось, что  $P_{\text{pl}} = 25\text{--}500$  Вт.

## Уравнения для расчёта параметров плазмы и катушки индуктивности

Для расчёта электрических параметров плазменного витка и катушки индуктивности использовалась трансформаторная модель индукционного разряда НД [5, 6] при допущении постоянно-токовой аналогии [4] и пространственной (радиальной и азимутальной) однородности  $E_{\text{pl}}$  и пренебрежении скин-эффектом.

$P_{\text{coil}}$  рассчитывалась как

$$P_{\text{coil}} = I_{\text{coil}}^2 R_{\text{coil}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{coil}}$  – ВЧ ток в катушке, а  $R_{\text{coil}}$  – активное сопротивление провода катушки, рассчитываемое как

$$R_{\text{coil}} = \rho_w l_{\text{coil}}, \quad (2)$$

где  $l_{\text{coil}}$  – длина провода катушки, определяемая как

$$l_{\text{coil}} = 2(l_{\text{per}} + H_{\text{per}})N. \quad (3)$$

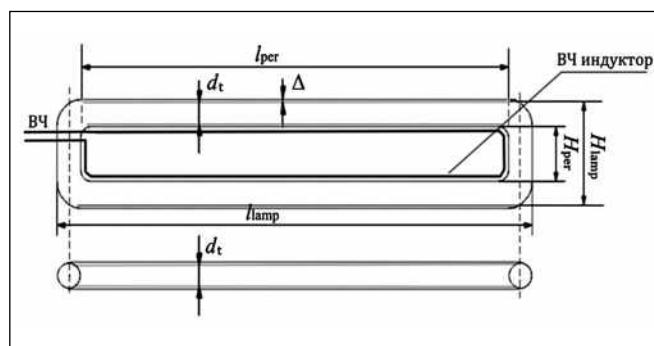


Рис. 1. Схематический эскиз бесферритной индукционной лампы с замкнутой разрядной трубкой и ВЧ индуктором (катушкой индуктивности)

Рис. 2. Зависимость мощности потерь в проводе катушки  $P_{\text{coil}}$  от мощности плазмы  $P_{\text{pl}}$ . Диаметр трубки  $d_t$ , мм: 16 (красный), 25 (синий), 38 (чёрный); давление аргона  $p_{\text{Ar}}$ , мм рт. ст.: ● – 0,1; ▲ – 0,3; ■ – 1,0; количество витков катушки  $N = 4$ ; частота ВЧ поля  $f = 3,4$  МГц

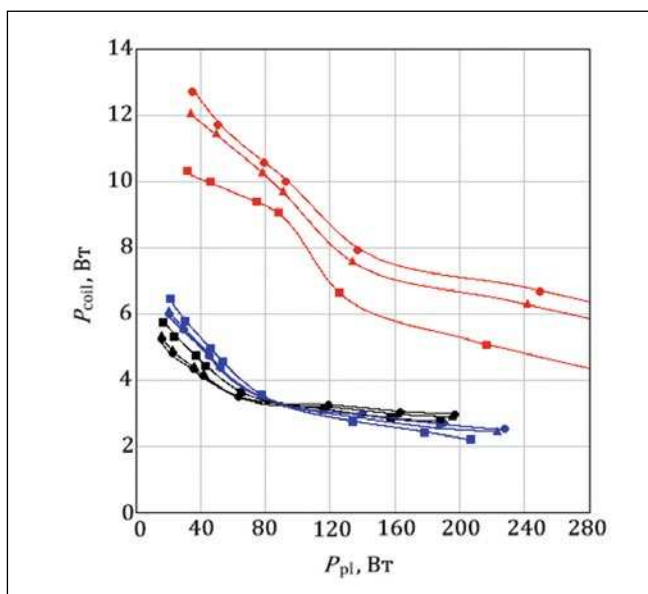


Рис. 3. Зависимость  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$ .  $d_t$ , мм: 16 (красный), 25 (синий), 38 (чёрный);  $p_{\text{Ar}}$ , мм рт. ст.: ● – 0,1; ▲ – 0,3; ■ – 1,0;  $N = 4$ ;  $f = 5,1$  МГц

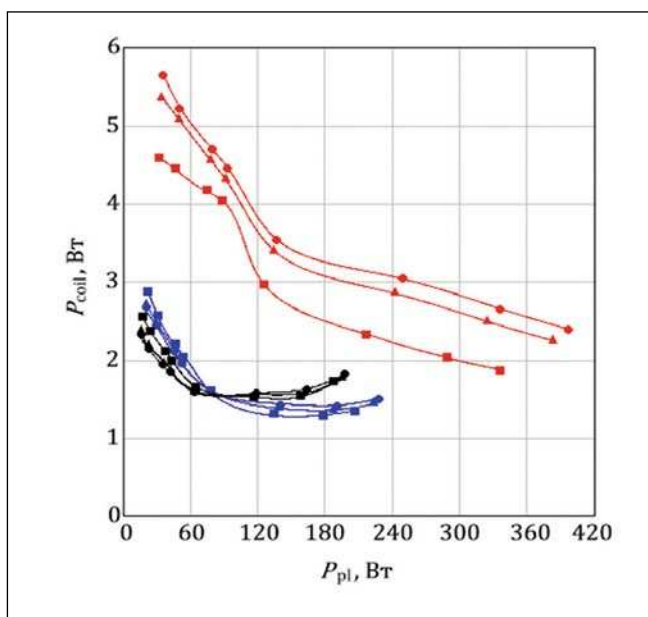
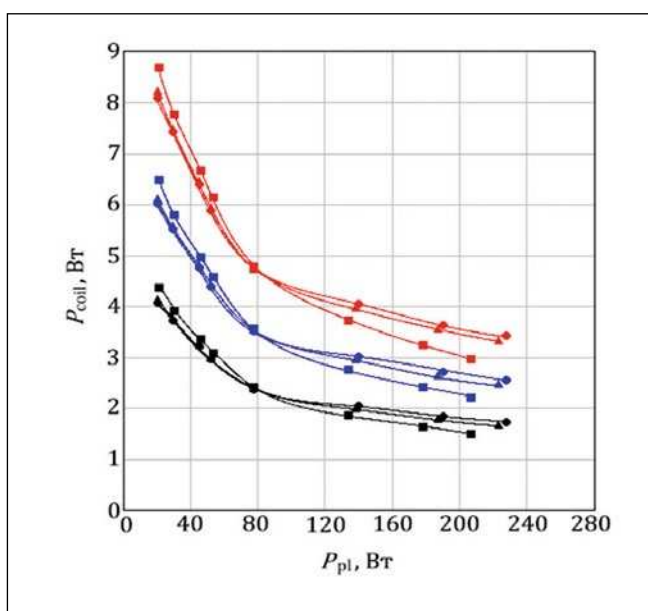


Рис. 4. Зависимость  $P_{\text{coil}}$  от мощности плазмы  $P_{\text{pl}}$ .  $d_t = 25$  мм;  $N$ : 3 (красный), 4 (синий), 6 (чёрный);  $p_{\text{Ar}}$ , мм рт. ст.: ● – 0,1; ▲ – 0,3; ■ – 1,0;  $f = 3,4$  МГц



В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда выражение для ВЧ тока индуктора  $I_{\text{coil}}$  имеет вид [6]

$$I_{\text{coil}} = \frac{\bar{E}_{\text{pl}} A_{\text{pl}} \sqrt{1 + Q_{\text{pl}}^2}}{\omega M}, \quad (4)$$

где  $A_{\text{pl}}$  – длина плазменного витка, определяемая как длина осевой линии замкнутой разрядной трубки,  $\bar{E}_{\text{pl}}$  – усреднённая по сечению плазменного витка активная составляющая напряжённости ВЧ электрического поля в плазме,  $M$  – взаимная индуктивность плазменного витка и катушки индуктивности [5, 6]:

$$M = k \sqrt{L_{\text{coil}} L_{\text{ind}}}, \quad (5)$$

где  $L_{\text{coil}}$  – индуктивность плоской катушки ( $D_{\text{coil}} \gg H_{\text{coil}}$ ):

$$L_{\text{coil}} = 0,56 \mu_0 \pi D_{\text{coil}} N^2, \quad (6)$$

где  $H_{\text{coil}} \approx d_w$  – высота катушки,  $D_{\text{coil}} = (4S_{\text{coil}}/\pi)^{1/2}$  – эквивалентный диаметр катушки;  $k$  – коэффициент связи плазменного витка с катушкой, рассчитываемый, как отношение охватываемой витком катушки площади  $S_{\text{coil}}$  к площади, охватываемой плазменным витком,  $S_{\text{pl}}$  [5, 6]:

$$k = \frac{S_{\text{coil}}}{S_{\text{pl}}},$$

где  $Q_{\text{pl}}$  – добротность плазменного витка, определяемая как

$$Q_{\text{pl}} = \frac{\omega L_{\text{ind}}}{R_{\text{pl}}},$$

где  $R_{\text{pl}} = P_{\text{pl}}/I_{\text{pl}}^2$  – активное сопротивление плазменного витка,  $I_{\text{pl}}$  – разрядный ток лампы,  $L_{\text{ind}}$  – геометрическая индуктивность плазменного витка [7]:

$$L_{\text{ind}} = 2\pi D_{\text{pl}} \left[ \ln \left( \frac{4D_{\text{pl}}}{0,39d_{\text{pl}}} \right) - 2 \right] \cdot 10^{-9},$$

где  $d_{\text{pl}} \approx 0,75d_t$  – диаметр сечения плазменного витка,  $D_{\text{pl}} = (4S_{\text{pl}}/\pi)^{1/2}$  – эквивалентный диаметр охватываемого плазменным витком сечения площадью  $S_{\text{pl}}$  [8].

Из (1)–(4) вытекает выражение, связывающее  $P_{\text{coil}}$  с параметрами катушки и плазмы индукционного разряда:

$$P_{\text{coil}} = \frac{(\bar{E}_{\text{pl}} A_{\text{pl}})^2 (1 + Q_{\text{pl}}^2) \rho_w l_{\text{coil}}}{(\omega M)^2}. \quad (7)$$

При этом, в приближении постоянно-токовой аналогии, в качестве значений  $\bar{E}_{\text{pl}}$  при указанных выше давлениях аргона и паров ртути использовались соответствующие значения напряжённости электрического поля в положительном столбе ртутно-аргонового разряда переменного тока на частоте 50 Гц [9].

Уравнение (7) с учётом выражений (3), (5) и (6) можно привести к виду

$$P_{\text{coil}} = \frac{(\bar{E}_{\text{pl}} A_{\text{pl}})^2 (1 + Q_{\text{pl}}^2) \rho_w (l_{\text{per}} + H_{\text{per}})}{0,28 \mu_0 \pi D_{\text{coil}} N (k \omega)^2 L_{\text{ind}}}. \quad (8)$$

### Результаты расчётов и их обсуждение

На рис. 2–5 приведены зависимости  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$ , рассчитанные для ламп с вышеуказанными вариантами конструкций разрядной трубки и ВЧ индуктора.

Видно, что при относительно малых  $P_{\text{pl}}$  во всех лампах  $P_{\text{coil}}$  заметно падает с ростом  $P_{\text{pl}}$ . С дальнейшим увеличением  $P_{\text{pl}}$  это падение «замедляется» и при некотором значении  $P_{\text{pl}} = P_{\text{pl, min}}$   $P_{\text{coil}}$  достигает минимума  $P_{\text{coil, min}}$ , а затем несколько возрастает с ростом  $P_{\text{pl}}$ . Чем больше  $d_t$ , тем при меньшем  $P_{\text{pl, min}}$  достигается  $P_{\text{coil, min}}$ .

Повышение  $f$  приводит к снижению  $P_{\text{coil}}$  и сдвигает  $P_{\text{coil, min}}$  в сторону меньших  $P_{\text{pl}}$ . Такое снижение следует из трансформаторной модели индукционного разряда, возбуждаемого на  $\omega \ll \nu_e$ , т.к. при этом изменение  $\omega$  никак не сказывается на балансе мощности в плазме [4]. Соответственно,  $\bar{E}_{\text{pl}}$ , а значит и ВЧ напряжение на плазменном витке  $U_{\text{pl}} (= \bar{E}_{\text{pl}} A_{\text{pl}})$ , не зависят от частоты  $\omega$ . В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда ВЧ напряжение на катушке индуктивности  $U_{\text{coil}}$  связано с  $U_{\text{pl}}$  как  $U_{\text{coil}} \approx U_{\text{pl}} N / k^{1/2}$  [2, 6].

В то же время индуктивное сопротивление катушки  $\omega L_{\text{coil}}$ , где  $L_{\text{coil}}$  – индуктивность катушки, линейно растёт с ростом  $\omega$ . А поскольку ток  $I_{\text{coil}} \approx U_{\text{coil}} / (\omega L_{\text{coil}})$ , т.к.  $\omega L_{\text{coil}} \gg R_{\text{coil}}$ , то он обратно пропорционален  $\omega$ , а  $P_{\text{coil}}$ , с учётом (1), обратно пропорционален  $f^2$ . Это и показывают результаты расчёта  $P_{\text{coil}}$  при двух разных  $f$ , 3,4 и 5,1 МГц, для ламп с одинаковыми

Рис. 5. Зависимость  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$ .  $d_t = 16$  и 25 мм;  $\rho_{\text{Ar}} = 1,0$  мм рт. ст.;  $N = 3$ ;  $f = 1,7$  МГц

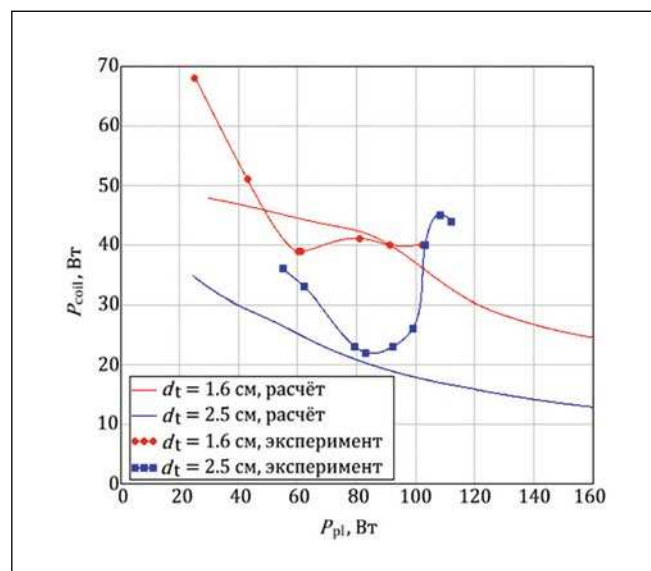
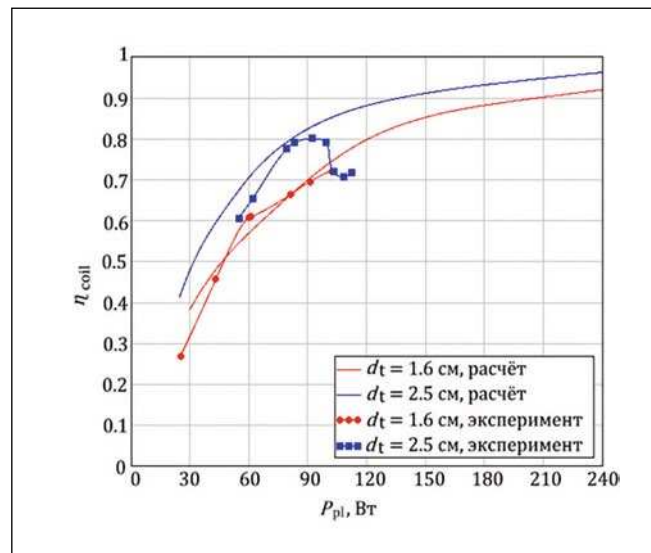


Рис. 6. Зависимость КПД ВЧ индуктора (катушки)  $\eta_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$ .  $d_t = 16$  и 25 мм;  $\rho_{\text{Ar}} = 1,0$  мм рт. ст.;  $N = 3$ ;  $f = 1,7$  МГц



конструктивными параметрами (рис. 2 и 3).

При этом также видно, что  $P_{\text{coil}}$  при относительно больших  $P_{\text{pl}}$  в лампе с  $d_t = 38$  мм может быть больше, чем в лампе с  $d_t = 25$  мм. Чем выше  $f$ , тем при меньших  $P_{\text{pl}}$  пересекаются кривые  $P_{\text{coil}}(P_{\text{pl}})$ , рассчитанные для ламп с разными  $d_t$ .

В низкотемпературной плазме НД повышение её мощности (фактически, концентрации электронов  $n_e$ ) сопровождается переходом ионизации от прямой к ступенчатой и, как следствие, уменьшением  $E_{\text{pl}}$  [4]. В индукционных бесферритных разрядах НД, возбуждаемых с помощью катушки индуктивности на частотах  $\omega \ll \nu_e$ , снижение  $\bar{E}_{\text{pl}}$  приводит к снижению  $U_{\text{pl}}$ , и, согласно (7) и (8), тем более  $P_{\text{coil}}$ .

Увеличение  $d_t$ , от 16 до 25 мм снижает  $\bar{E}_{\text{pl}}$  [2, 9], что, по (8), существенно снижает  $P_{\text{coil}}$  (рис. 2 и 3), но уве-

личивает  $A_{\text{pl}}$  и  $Q_{\text{pl}}$ , и уменьшает (из-за увеличения  $S_{\text{pl}})$   $k$ . В результате, как следует из (8) и рис. 2 и 3, зависимость  $P_{\text{coil}}$  от  $d_t$  носит сложный характер, с минимумом при повышенных  $P_{\text{pl}}$  и  $f$ .

Повышение давления буферного газа (аргона) от 0,1 до 1,0 мм рт. ст. несущественно снижает  $E_{\text{pl}}$  [9] и, в соответствии с (7) и (8),  $P_{\text{coil}}$  (рис. 2 и 3).

Рост  $P_{\text{pl}}$  (а, следовательно,  $I_{\text{pl}}$  и  $n_e$ ) сопровождается уменьшением  $R_{\text{pl}}$ , что (при разумном допущении независимости  $L_{\text{ind}}$  от  $I_{\text{pl}}$ ) повышает  $Q_{\text{pl}} (= \omega L_{\text{ind}} / R_{\text{pl}})$ . При малых  $P_{\text{pl}}$ , когда велико  $R_{\text{pl}}$ ,  $Q_{\text{pl}}$  низка ( $< 0,1$ ) и, согласно (7) и (8), не влияет на  $P_{\text{coil}}$ . С ростом  $P_{\text{pl}}$  и  $d_t$  уменьшается  $R_{\text{pl}}$  и  $Q_{\text{pl}}$ , и, соответственно, растёт влияние последней на  $P_{\text{coil}}$  и на характер зависимости  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$ , которая из падающей становится возрастающей, образуя минимум (рис. 3). Аналогичные зависи-

мости  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$  с минимумом, смещающимся с ростом  $f$  и  $d_t$  в сторону меньших  $P_{\text{pl}}$ , экспериментально наблюдались в линейных бесферритных индукционных лампах, возбуждаемых с помощью катушки индуктивности на  $f = 6\text{--}12$  МГц [10].

Как видно из рис. 4, увеличение  $N$  снижает  $P_{\text{coil}}$ , согласно (11).

### Сравнение результатов расчёта с экспериментом

Как видно из рис. 5, рассчитанные для обеих указанных ламп значения  $P_{\text{coil}}$  с ростом  $P_{\text{pl}}$  практически монотонно падают с 48 до 25 Вт при  $d_t = 16$  мм и с 35 до 12 Вт при  $d_t = 25$  мм. При этом экспериментальные зависимости  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$  [2] (рис. 5) имеют по одному минимуму: слабо выраженному при  $P_{\text{pl, min}} = 60$  Вт в лампе с  $d_t = 16$  мм и ярко выраженному при  $P_{\text{pl, min}} = 85$  Вт в лампе с  $d_t = 25$  мм. Отметим, что в лампе с  $d_t = 16$  мм экспериментальные значения  $P_{\text{coil}}$  близки к рассчитанным, а в лампе с  $d_t = 25$  мм значительно больше них.

Из рис. 5 также видно, что минимумы кривых  $P_{\text{coil}}(P_{\text{pl}})$  приходятся на заметно меньшие  $P_{\text{pl}}$  чем те, которые в индукционных разрядах с  $f = 1,7$  МГц соответствуют минимумам, связанным с повышением  $Q_{\text{pl}}$  с ростом  $P_{\text{pl}}$ . Представляется, что минимум и последующий рост  $P_{\text{coil}}$  в экспериментальных зависимостях  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$  для обеих ламп связаны со скин-эффектом, проявляющимся в индукционных разрядах при  $f = 1\text{--}5$  МГц и  $n_e > 10^{11}$  см<sup>-3</sup> [4, 10, 11].

Действительно, скин-эффект, «выталкивающий» ВЧ электрическое поле к стенкам разрядной трубки в месте расположения провода катушки, повышает  $\bar{E}_{\text{pl}}$  [4, 11], приводя этим к росту  $P_{\text{coil}}$ . Расхождение расчётных данных с экспериментальными, вероятно, связано с учётом скин-эффекта в модели индукционного разряда.

Из рис. 6 видно, что в обеих рассматриваемых лампах при относительно малых  $P_{\text{pl}}$   $\eta_{\text{coil}}$  с ростом  $P_{\text{pl}}$  быстро растёт, далее асимптотически, при больших  $P_{\text{pl}}$ , стремясь к 1. Различия в характере экспериментальных и рассчитанных зависимостей  $\eta_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$  в лампе с  $d_t = 25$  мм при  $P_{\text{pl}} > 85$  Вт, очевидно, связаны с учётом скин-эффекта в расчётной модели, приводящего к повышению  $P_{\text{coil}}$  при таких  $P_{\text{pl}}$  и соответствующему снижению  $\eta_{\text{coil}}$ .

### Заключение

- С использованием трансформаторной модели получены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать мощность потерь в проводе катушки индукционного разряда НД  $P_{\text{coil}}$ , возбуждаемого на частотах  $\omega \ll \nu_e$  в бесферритной замкнутой трубке в смеси паров ртути и аргона.

- Обнаружено, что зависимость  $P_{\text{coil}}$  от  $P_{\text{pl}}$  имеет минимум, который сдвигается с увеличением диаметра разрядной трубки  $d_t$  и частоты ВЧ поля  $f$  в сторону меньших  $P_{\text{pl}}$ .

- Показано, что  $d_t$  влияет на  $P_{\text{coil}}$  «через» напряжённость электрического поля, добротность и длину плазменного витка и коэффициент связи катушки с плазменным витком.

- Установлено, что  $P_{\text{coil}}$  обратно пропорциональна числу витков катушки  $N$  и в исследованном интервале давлений 0,1–1,0 мм рт. ст. незначительно снижается с ростом давления инертного газа (аргона).

- Результаты расчётов  $P_{\text{coil}}$  и КПД катушки для бесферритной индукционной лампы с  $d_t = 16$  мм находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом. Расхождения с экспериментом результатов аналогичных расчётов для лампы с  $d_t$  большего диаметра, 25 мм, при  $P_{\text{pl}} \geq 80$  Вт предположительно связаны с учётом в трансформаторной модели индукционного разряда НД скин-эффекта, проявляющегося при повышенных  $P_{\text{pl}}$ .

- Полученные результаты могут использоваться для оптимизации конструктивных параметров ( $d_t$  и длины разрядной трубки,  $N$ ) и  $f$  ВЧ поля индукционных бесферритных ртутных УФ ламп НД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Левченко В.А., Васина В.Н. Индукционная УФ лампа на основе ртутного разряда НД в замкнутой бесферритной трубке // Светотехника. – 2019. – № 2. – С. 44–46.
2. Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Васина В.Н., Левченко В.А. Электрические и излучательные характеристики индукционных бесферритных ртутных УФ ламп в замкнутых трубках // Вестник МЭИ. – 2019. – № 3. – С. 87–97.
3. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические

и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм // Светотехника. – 2016. – № 1. – С. 41–44.

4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 591 с.

5. Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M. A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge // Plasma Sources Sci. Technol. – 1992. – № 1. – P. 179–185.

6. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160–1000 kHz // Plasma Sources Science and Technology. – 2002. – Vol. 11. – P. 218–227.

7. Gudmundsson J.T. and Lieberman M.A. Magnetic induction and plasma impedance in a cylindrical inductive discharge // Plasma Sources Sci. Tech. – 1997. – Vol. 6. – № 4. – P. 540–550.

8. Попов О.А., Старшинов П.В., Васина В.Н. Исследование характеристик индукционного бесферритного ртутного разряда низкого давления в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. – 2018. – № 4. – С. 89–96.

9. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 720 с.

10. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 1. Электрические параметры индуктивной катушки // Успехи прикладной физики. – 2016. – № 2. – С. 139–149.

11. Никифорова В.А., Попов О.А. Влияние частоты ВЧ поля и разрядного тока на радиальное распределение параметров плазмы индукционного бесферритного разряда в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. – 2012. – № 1 – С. 108–114.



**Ловля Екатерина Владимировна,**  
студент кафедры  
«Светотехника»  
НИУ «МЭИ»



**Попов Олег Алексеевич,** доктор техн. наук.  
Окончил в 1965 г.  
МЭИ. Профессор  
кафедры «Светотехника» НИУ  
«МЭИ». Академик  
АН РФ