

УДК 537.533

Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления Часть I. Электрические параметры индуктивной катушки

С. А. Свитнев, О. А. Попов, В. А. Левченко, П. В. Старшинов

Индукционный разряд возбуждался на частотах $f = 0,5—12,0$ МГц и мощности $P = 25—160$ Вт в смеси паров ртути ($0,01$ Торр) и аргона ($0,1—0,6$ Торр) в цилиндрических разрядных трубках длиной 300 мм и диаметром $D = 40, 50, 60$ и 70 мм с помощью индуктивной катушки, охватывающей трубку по ее продольному периметру. Установлено, что зависимости тока катушки I_{coil} и мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P имеют минимум, сдвигающийся в сторону меньших мощностей с увеличением диаметра трубки D , частоты разрядного тока f и числа витков катушки n . Зависимость P_{coil} от частоты f имеет минимум, сдвигающийся с увеличением мощности лампы P в сторону меньших частот. КПД индуктивной катушки η_{coil} возрастает с увеличением мощности лампы, диаметра разрядной трубки, частоты разрядного тока, давления аргона и числа витков катушки. Результаты расчета электрических параметров индуктивной катушки находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Ключевые слова: индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, индуктивная катушка, мощность потерь, добротность плазмы, скин-эффект.

Введение

Разрядные ртутные лампы, использующие плазму индукционного разряда низкого давления, возбуждаемого током катушки, охватывающей разрядную трубку по ее продольному периметру, являются перспективными источниками видимого и ультрафиолетового (УФ) излучения [1—4]. Их отличает большой срок службы (> 60000 ч), возможность работать на высоких разрядных токах $3—8$ А и на низких давлениях инертных газов

($0,05—0,5$ Торр), при которых КПД генерации УФ-излучения максимален [5—7]. Лампы отличаются простотой конструкции и могут применяться в качестве бактерицидных ламп для очистки и обеззараживания воды и воздуха, заменяя короткоживущие ртутные разрядные УФ лампы с внутренними электродами. К сожалению, число публикаций по исследованию характеристик индукционных ламп такого типа незначительно [1, 2, 4].

В работе [4] нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования электрических и излучательных характеристик индукционного разряда, возбужденного в трубке диаметром 38 мм в смеси паров ртути (10^{-2} Торр) и аргона ($0,1—0,7$ Торр) на частоте $13,56$ МГц и мощностях $100—260$ Вт. В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик бесферритных индукционных ламп, проведенных в широком интервале частот разрядного тока, мощностей лампы и конструктивных параметров разрядной трубки и индуктивной катушки. В первой ее части приведены результаты исследования влияния мощности лампы, диаметра разрядной трубки, частоты разрядного тока, количества витков катушки и давления аргона на электрические параметры индуктивной катушки: ток, мощность потерь в проводе катушки и ее КПД.

Свитнев Сергей Александрович, ведущий инженер¹.

Попов Олег Алексеевич, профессор².

Левченко Владимир Александрович, инженер¹, аспирант³.

Старшинов Павел Валерьевич, аспирант².

¹ НПО «ЛИТ».

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1.

E-mail: svitnevs@yandex.ru

² Московский энергетический институт.

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

E-mail: olegorov734@yahoo.com

³ Московский физико-технический институт.

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

Институтский пер., 9.

E-mail: mscoff@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 марта 2016 г.

© Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко В. А.,
Старшинов П. В., 2016

Экспериментальная установка и методики измерений

Схема питания лампы индукционного разряда и измерения ее электрических и излучательных характеристик представлена в [1, 2]. Синусоидальное напряжение малой мощности (< 1 Вт) подавалось с задающего генератора синусоидальных и импульсных сигналов РМ 5193 (Philips) на широкополосный (0,1—30 МГц) усилитель мощности А-300 (ENI). От него ВЧ-напряжение (до 3 кВ) подавалось на измеритель поступающей и отраженной мощности P_{for} и P_{ref} (NAP Z8, Rhode-Schwartz). Проходящая мощность $P_{tr} = P_{for} - P_{ref}$ подавалась через согласующий контур на индуктивную катушку. Напряжение на индуктивной катушке U_{coil} измерялось с помощью высоковольтного делителя напряжения, включенного между катушкой и согласующим Г-контуром, и 4-канального осциллографа HP 54503A (Hewlett Packard). ВЧ-ток катушки I_{coil} измерялся с помощью трансформатора тока, напряжение с которого подавалось на вход осциллографа, что позволяло измерять сдвиг фазы θ между напряжением и током катушки и таким образом определять поглощаемую лампой мощность P , а в отсутствие разряда — мощность потерь в проводе катушки P_{coil} .

Индукционный разряд зажигался в цилиндрических трубках длиной $H = 300$ мм и диаметром $D = 40, 50, 60$ и 70 мм с помощью индуктивной катушки, витки которой охватывали разрядную трубку по ее продольному периметру. Катушка имела от 2 до 8 витков и изготовлялась из медного посеребренного провода диаметром $d_w = 1,6$ мм, имеющего на частотах $f = 1—14$ МГц низкое погонное сопротивление $\rho_w = (2—7) \times 10^{-3}$ Ом/см [2]. Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживалось оптимальным (максимум потока УФ-излучения на длине волны 254 нм, F_{254}) регулировкой температуры амальгамы, размещенной в штенгеле. Давление буферного газа (аргон) p_{Ar} варьировалось от 0,1 до 0,6 Торр. Индуктивность катушек $L_{coil} = (2,3—10,0)$ мкГн обеспечивала на рабочих частотах лампы $f = 2—14$ МГц их собственную высокую добротность $Q_{coil} = \omega L_{coil} / R_{coil} = 200—400$, где $R_{coil} = \rho_w l_{coil}$ — активное сопротивление катушки, а l_{coil} — длина провода катушки.

Уравнения тока и мощности потерь в индуктивной катушке

Поскольку на частотах $f < 15$ МГц электромагнитной мощностью, рассеиваемой индуктивной катушкой $P_{изл}$, можно пренебречь, то потребляемая лампой от источника питания ВЧ-мощность P складывается из мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда P_{pl} , и мощности

потерь в проводе катушки P_{coil} , рассчитываемой как и в работах [1, 4]:

$$P_{coil} = R_{coil} I_{coil}^2 = \rho_w l_{coil} I_{coil}^2 = \rho_w 2n(D+H) I_{coil}^2, \quad (1)$$

где n — число витков катушки, $l_{coil} = 2n(D+H)$ — длина провода катушки, охватывающего разрядную трубку по ее продольному периметру, равному длине одного витка $l_1 = 2(H+D)$.

Ток индуктивной катушки I_{coil} в рамках трансформаторной модели индукционного разряда связан с параметрами катушки и плазмы как и в работах [4, 7, 8]:

$$I_{coil} = P_{pl} \left(1 + Q_2^2\right)^{1/2} / I_{pl} \omega M, \quad (2)$$

где $Q_2 = (\omega L_2 + \omega R_{pl}/v_e)/R_{pl}$ — добротность плазменного витка [1, 4, 8]; L_2 и R_{pl} соответственно геометрическая индуктивность плазменного витка и его активное сопротивление; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота разрядного тока; $\omega R_{pl}/v_e$ — индуктивная составляющая сопротивления плазмы, связанная с инерцией электронов [8, 9]; v_e — частота упругих соударений электронов с атомами рабочей смеси (ртути и аргона); I_{pl} — разрядный ток; $M = k(L_{coil}L_2)^{1/2}$ — взаимная индуктивность катушки и плазменного витка; $k = S_{pl}/S_{coil}$ — коэффициент связи плазменного витка с индуктивной катушкой ($k < 1$) [1, 4]; $S_{coil} = HD$ — площадь продольного (осевого) сечения трубки, охваченная витками индуктивной катушки [1]; S_{pl} — площадь части продольного сечения разрядной трубки, «охваченная» плазменным витком длиной Λ_{pl} , где $\Lambda_{pl} \approx 2H + D$ — длина плазменного витка, определяемая по длине пути замкнутого разрядного тока лампы I_{pl} [1].

Подставив в (2) выражение для M и $U_a = P_{pl}/I_{pl} = E_a \Lambda_{pl}$ (активная составляющая ВЧ-напряжения на плазменном витке), получим для тока катушки выражение:

$$\begin{aligned} I_{coil} &= U_a \left(1 + Q_2^2\right)^{1/2} / \omega k (L_{coil}L_2)^{1/2} = \\ &= E_a \Lambda_{pl} \left(1 + Q_2^2\right)^{1/2} / \omega k (L_{coil}L_2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_a — активная составляющая напряженности электрического ВЧ-поля в плазме E_{pl} , имеющей в общем случае комплексный характер [8, 9]:

$$E_{pl} = \left(E_a^2 + E_{ind}^2\right)^{1/2} = E_a \left[1 + (\omega/v_e)^2\right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $E_{ind} = E_a \omega/v_e$ — реактивная (индуктивная) составляющая напряженности электрического ВЧ-поля в плазме.

Как следует из (4), при относительно малых частотах разрядного тока $\omega = 2\pi f$ и/или больших частотах соударений электронов с атомами рабочей смеси ν_e (больших давлениях рабочей смеси, таких, что $\omega/\nu_e < 0,1$), напряженность электрического ВЧ-поля в плазме индукционного разряда имеет чисто активный характер ($E_{pl} = E_a$).

Для дальнейших расчетов используем погонное сопротивление провода катушки ρ_w [1, 2], которое можно определить по формуле:

$$\rho_w \approx (1,5 + 0,4f)10^{-3}, \quad (5)$$

где f в МГц, а также учтем индуктивность катушки L_{coil} , значение которой при $D \gg nd_w$ имеет вид:

$$L_{coil} = 2,22\mu_0 H D n^2, \quad (6)$$

Подставив в (1) выражения для разрядного тока (3), длины плазменного витка $L_{pl} = 2H + D$, погонного сопротивления провода катушки (5) и индуктивности катушки (6), получим соотношение, связывающее мощность потерь в проводе катушки P_{coil} с длиной и диаметром разрядной трубки H и D , частотой разрядного тока f и параметрами плазмы индукционного разряда (активной составляющей напряженности электрического поля в плазме E_a , геометрической индуктивностью плазменного витка L_2 и его добротностью Q_2), в следующем виде:

$$P_{coil} = 0,225 \times 10^{-4} (1,5 + 0,4f) E_a^2 (2H + D)^2 \times (H + D) (1 + Q_2^2) / \mu_0 k^2 f^2 L_2 n H D. \quad (7)$$

Из (7) видно, что мощность потерь в проводе катушки «быстро» возрастает с увеличением активной составляющей напряженности электрического ВЧ-поля в плазме ($P_{coil} \sim E_a^2$) и добротности плазменного витка, $P_{coil} \sim (1 + Q_2^2)$, и уменьшается с увеличением числа витков катушки n . Зависимость P_{coil} от частоты разрядного тока f немонотонна. На относительно низких частотах f , когда $\omega/\nu_e \ll 1$ и $0,4f \ll 1,5$, а также при низких удельных мощностях плазмы и, следовательно, низких плотностях плазмы, когда $Q_2 < 0,3$, мощность потерь в проводе катушки уменьшается с увеличением частоты разрядного тока как $1/f^2$. На более высоких частотах f , когда $\omega/\nu_e > 0,3$ и $Q_2 > 0,3$, ее увеличение вызывает рост реактивной составляющей напряженности электрического поля E_{ind} и, следовательно, добротности плазменного витка Q_2 . В результате, мощность потерь в проводе катушки P_{coil} в соответствии с (7) уменьшается с увеличением частоты разрядного тока f «медлен-

нее», а затем и возрастает, образуя минимум в зависимости P_{coil} от f .

Зависимость P_{coil} от диаметра разрядной трубки D имеет немонотонный характер. Поскольку индуктивность плазменного витка $L_2 \sim H$, а $E_a \sim 1/D^{1/2}$, то согласно (7), при $D \ll H$ мощность потерь в проводе катушки уменьшается с увеличением диаметра трубки как $P_{coil} \sim 1/D^{1,5}$. С увеличением диаметра трубки зависимость P_{coil} от D становится менее «крутой», достигает своего минимального значения, затем возрастает и в пределе $D \gg H$ растет с увеличением диаметра трубки как $P_{coil} \sim D^{1,5}$.

Влияние мощности плазмы и диаметра разрядной трубки на электрические параметры индуктивной катушки

На рис. 1 приведены зависимости мощности потерь в индуктивной катушке P_{coil} от мощности лампы P , рассчитанные по формуле (1) для ламп с трубками длиной $H = 300$ мм и с диаметрами $D = 40, 50, 60$ и 70 мм в смеси паров ртути (0,01 Торр) и аргона (0,1 Торр), возбужденных на частоте $f = 9,5$ МГц с помощью 2-витковой индуктивной катушки с проводом диаметром $d_w = 1,6$ мм и погонным сопротивлением ρ_w , рассчитанным по (6). Ток катушки I_{coil} рассчитывался в рамках электродинамической модели индукционного разряда [3] для индукционных ламп с такими же конструктивными параметрами разрядных трубок и индуктивной катушки, возбужденных на той же частоте 9,5 МГц.

Приведенные на рис. 1 экспериментальные зависимости P_{coil} от P , измеренные в двух лампах с разрядными трубками диаметром $D = 50$ и 70 мм, показывают хорошее согласие расчета с экспериментом.

Из рис. 1 видно, что зависимости P_{coil} от P имеют минимум при P_{min} , сдвигающийся с увеличением диаметра трубки D в сторону меньших мощностей лампы P . Чем больше диаметр трубки, тем меньше минимальное значение $(P_{coil})_{min}$. Уменьшение P_{coil} при повышении мощности лампы P (фактически, мощности плазмы P_{pl} , поскольку $P \gg P_{coil}$) связано с ростом концентрации электронов плазмы, приводящим к снижению активной составляющей напряженности электрического ВЧ-поля в плазме E_a . Это явление, характерное для низкотемпературной плазмы низкого давления, связано с переходом механизма ионизации в плазме от прямой к ступенчатой [8, 9]. В соответствии с формулой (7), уменьшение E_a снижает мощность потерь в проводе катушки P_{coil} , которая будет падать до тех пор, пока рост концентрации электронов не приведет к появлению факторов, сначала снижающих «скорость» уменьшения P_{coil} , а затем и вызывающих рост P_{coil} .

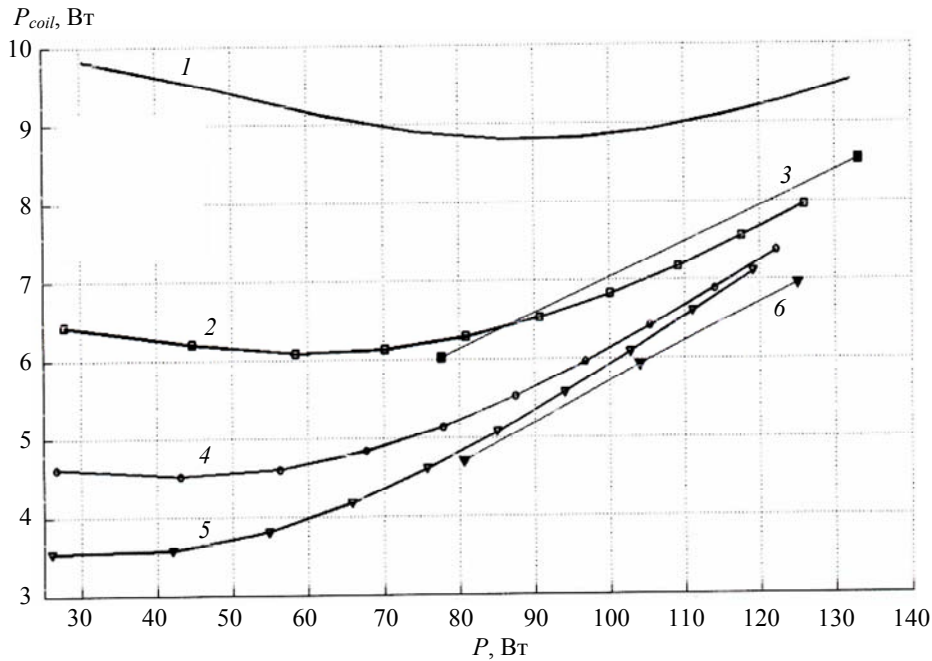


Рис. 1. Зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P в разрядных трубках с различным диаметром: кривая 1 — $D = 40$ мм, 2 — $D = 50$ мм, 3 — $D = 50$ мм (эксперимент), 4 — $D = 60$ мм, 5 — $D = 70$ мм, 6 — $D = 70$ мм (эксперимент). Длина трубки $H = 300$ мм; давление аргона $p_{Ar} = 0,1$ Торр; число витков катушки $n = 2$; частота разрядного тока $f = 9,5$ МГц.

Одна из возможных причин роста тока катушки и мощности потерь в ней связана с увеличением на больших мощностях плазмы P_{pl} добротности плазменного витка $Q_2 = (\omega L_2 + \omega R_{pl}/v_e)/R_{pl}$. Действительно, на низких частотах $f < 1$ МГц и/или на малых удельных мощностях плазмы $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl} < 0,5$ Вт/см (больших сопротивлений плазмы R_{pl}) индуктивное сопротивление плазменного витка $\omega L_2 \ll R_{pl}$. В этих условиях $Q_2 \ll 0,1$ и, в соответствии с (3) и (7), ток катушки I_{coil} и мощность потерь в ней P_{coil} не зависят от Q_2 . С увеличением мощности плазмы уменьшается ее активное сопротивление R_{pl} и, следовательно, возрастает отношение $\omega L_2/R_{pl}$ и, следовательно, увеличивается добротность плазменного витка так, что при $Q_2 > 0,3$ она начинает влиять на мощность потерь в проводе катушки, которая, в соответствии с (7), растет как $P_{coil} \sim (1 + Q_2^2)$ [7, 12, 13].

Другой причиной, вызывающей увеличение тока катушки и мощности потерь в ней может стать скин-эффект, вытесняющий электрическое ВЧ-поле к стенкам разрядной трубки, где размещены витки катушки, что вызывает повышение средней по сечению плазменного витка активной составляющей напряженности электрического ВЧ-поля в плазме E_a [3, 10, 11]. Увеличение E_a вызывает, в соответствии с (3), рост тока катушки I_{coil} , а в соответствии с (7) — увеличение мощности потерь в проводе катушки P_{coil} . Так как в разрядных трубках большего диаметра ниже напряженность электрического ВЧ-поля и выше проводимость плазмы, то скин-эффект в плазме ламп с трубками

большого диаметра начинает проявляться при меньших мощностях плазмы, чем в плазме ламп с трубками меньшего диаметра. Соответственно с увеличением диаметра разрядной трубки D минимум в зависимости P_{coil} от P сдвигается в сторону меньших мощностей лампы, что подтверждается расчетом и наблюдается в эксперименте (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что чем больше диаметр трубки D , тем «быстрее» растет с увеличением мощности лампы мощность потерь в проводе катушки P_{coil} . В результате, зависимость P_{coil} от D , как это следует из (7), имеет слабо выраженный минимум, сдвигающийся с увеличением мощности лампы в сторону меньших диаметров трубки. Аналогичную зависимость от диаметра трубки D имеет ток в катушке I_{coil} .

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости КПД катушки $\eta_{coil} = 1 - P_{coil}/P$ от мощности лампы P , полученные на частоте $f = 9,5$ мГц с 2-витковой катушкой. Видно, что на относительно малых мощностях лампы $P = 30-60$ Вт КПД индуктивной катушки быстро возрастает с увеличением мощности лампы P и диаметра трубки D . На больших мощностях лампы ($P > 100$ Вт) η_{coil} растет с увеличением мощности лампы значительно медленнее, асимптотически приближаясь к своему максимальному значению, примерно одинаковому у всех исследованных ламп с разными диаметрами разрядных трубок $(\eta_{coil})_{max} \approx 0,94$. Чем больше диаметр трубки D , тем при меньших мощностях лампы КПД 2-витковой катушки достигает своего максимального значения.

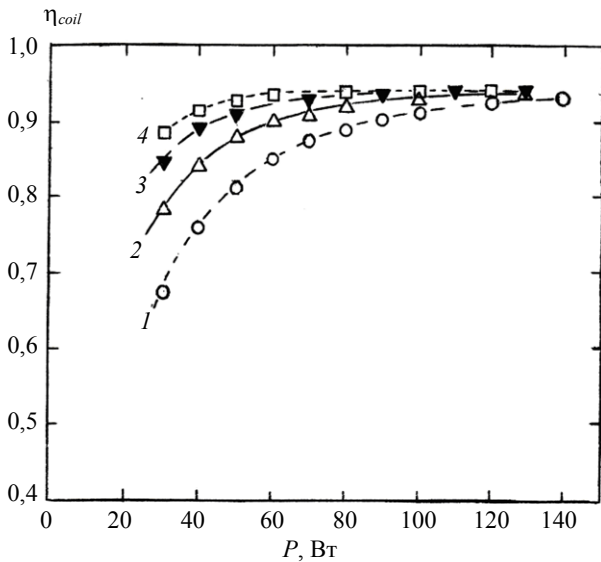


Рис. 2. Зависимость КПД индуктивной катушки $\eta_{coil} = 1 - P_{coil}/P$ от мощности лампы P . Параметры ламп как на рис. 1. Кривая 1 — $D = 40$ мм; 2 — $D = 50$ мм; 3 — $D = 60$ мм; 4 — $D = 70$ мм.

Влияние частоты разрядного тока на электрические параметры индуктивной катушки

На рис. 3 приведены рассчитанные по электродинамической модели индукционного разряда [3] зависимости тока в катушке I_{coil} от мощности индукционной лампы P с разрядной трубкой диаметром $D = 60$ мм, наполненной смесью Hg(0,01 Торр)/Ar(0,1 Торр) и работающей с 2-витковой катушкой на разных частотах разрядного тока $f = 6,5; 8,0; 9,5$ и $12,0$ МГц. Там же приведены экспериментальные зависимости I_{coil} от P , измеренные в лампе диаметром $D = 60$ мм на двух частотах ($f = 9,5$ и $12,0$ МГц) и иллюстрирующие хорошее согласие результатов расчета с экспериментом. Видно, что с увеличением частоты разрядного тока минимум в зависимости I_{coil} от P сдвигается в сторону меньших мощностей лампы от 70 Вт ($f = 6,5$ МГц) до 25 Вт ($f = 12,0$ МГц).

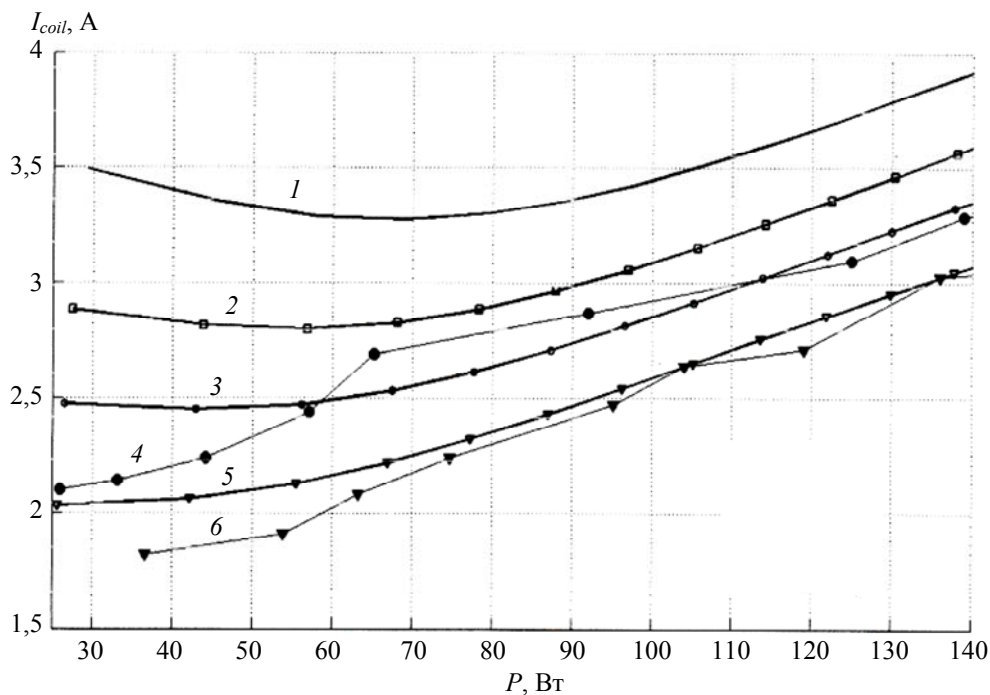


Рис. 3. Зависимость тока индуктивной катушки I_{coil} от мощности лампы P на различных частотах разрядного тока: кривая 1 — $f = 6,5$ МГц; 2 — $f = 8,0$ МГц; 3 — $f = 9,5$ МГц, 4 — $f = 9,5$ МГц (эксперимент), 5 — $f = 12,0$ МГц, 6 — $f = 12,0$ МГц (эксперимент). $H = 300$ мм; $D = 60$ мм; $p_{Ar} = 0,1$ Торр; $n = 2$.

Зависимости мощности потерь в проводе 2-витковой катушки P_{coil} от мощности лампы P , рассчитанные по (1) для частот $f = 6,5; 8,0; 9,5$ и $12,0$ МГц, приведены на рис. 4. Откуда следует, что зависимости имеют минимумы при тех же мощностях лампы P_{min} , сдвигающиеся с увеличением частоты разрядного тока в сторону меньших мощностей плазмы и, следовательно, меньших плотностей плазмы. Сдвиг минимума вызван дву-

мя обсуждавшимися выше причинами: увеличением добротности плазменного витка Q_2 и скин-эффектом. Действительно, увеличение частоты тока f повышает обе индуктивные составляющие сопротивления плазменного витка ωL_2 и $\omega R_{pl}/v_e$ и, следовательно, добротность плазменного витка Q_2 . Увеличение последней приводит, в соответствии с (3) и (7), к росту тока катушки и мощности потерь в ней, что вызывает сдвиг минимума в зависимо-

стях I_{coil} и P_{coil} от P в сторону меньших мощностей лампы. Увеличение частоты разрядного тока f понижает концентрацию электронов плазмы (и, следовательно, мощность плазмы), при которой начинает проявляться скин-эффект. Скинирование вызывает рост активной составляющей напряженности электрического поля E_a , а с ней, согласно (3) и (7), увеличение I_{coil} и P_{coil} , что сдвигает в сторону меньших мощностей лампы минимум в зависимостях I_{coil} и P_{coil} от P .

Как следует из рис. 3 и рис. 4, в области $P > P_{min}$ зависимости I_{coil} от P , рассчитанные для разных частот тока f , идут «параллельно» друг другу,

в то время как зависимости P_{coil} от P «непараллельны». И чем выше частота разрядного тока f , тем «круче» растет P_{coil} с увеличением P , так что при определенной мощности лампы зависимости пересекаются. В результате, в зависимости P_{coil} от f образуется минимум, который с увеличением мощности лампы (плазмы) сдвигается в сторону меньших частот разрядного тока. Возникновение минимума, очевидно, связано с увеличением погонного сопротивления провода катушки ρ_w , которое, в соответствии с формулой (5), возрастает с увеличением f .

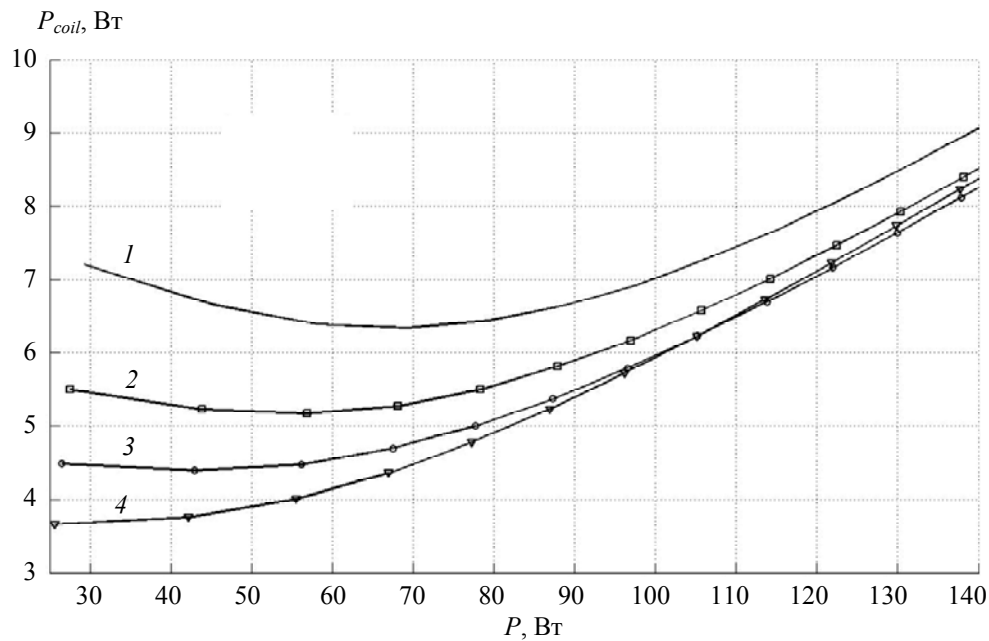


Рис. 4. Зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P при различных частотах: кривая 1 — $f = 6,5$ МГц, 2 — $f = 8$ МГц, 3 — $f = 9,5$ МГц, 4 — $f = 12$ МГц. Параметры лампы те же, что на рис. 3.

Отметим, что аналогичные зависимости мощности потерь в ВЧ-индукторе от мощности лампы и от частоты ВЧ-поля (разрядного тока) наблюдались в лампах трансформаторного типа и в лампах с полостью, работающих с магнитным усилением на более низких частотах $f = 100$ — 500 кГц и более высоких удельных мощностях плазмы [13, 14].

Влияние числа витков индуктивной катушки на ее электрические параметры

На рис. 5 приведены зависимости тока в индуктивной катушке I_{coil} от мощности лампы P , рассчитанные в рамках электродинамической модели [3] для ламп с индуктивными катушками с числом витков $n = 1, 2$ и 3 . Расчет проводился для лампы с разрядной трубкой длиной $H = 300$ мм и диаметром $D = 60$ мм, наполненной парами ртути (0,01 Торр)

и аргоном (0,1 Торр), работающей на частоте $f = 8$ МГц. Видно, что зависимость I_{coil} от P имеет минимум, положение которого незначительно сдвигается в сторону меньших мощностей лампы с увеличением числа витков в катушке: от $P_{min} = 62$ Вт ($n = 1$) до $P_{min} = 52$ Вт ($n = 3$). Разрядный ток уменьшается в соответствии с (2) с увеличением числа витков как $I_{coil} \sim 1/n$.

На рис. 5 приведена также экспериментальная зависимость I_{coil} от P (кривая 4), показывающая хорошее согласие расчета с экспериментом. В соответствии с формулой (1), зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P также имеет минимум, который сдвигается в сторону меньших мощностей лампы с увеличением числа витков катушки, а мощность потерь в катушке, в соответствии с (7), уменьшается с увеличением числа витков как $P_{coil} \sim 1/n$.

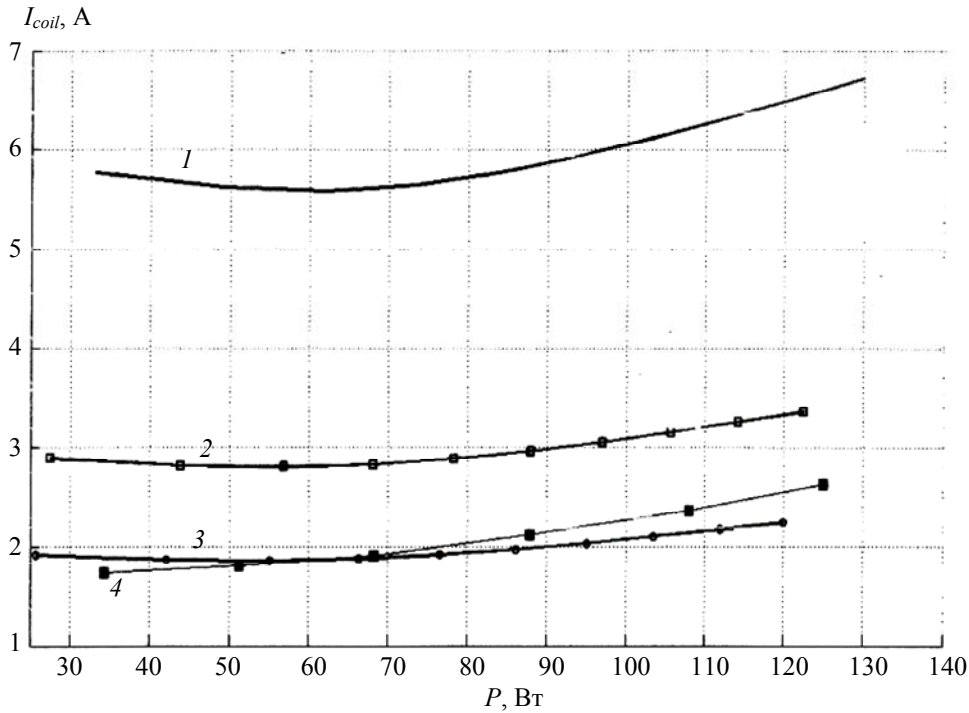


Рис. 5. Зависимость тока индуктивной катушки I_{coil} от мощности лампы P с катушками с разным числом витков: кривая 1 — $n = 1$; 2 — $n = 2$; 3 — $n = 3$; 4 — $n = 3$ (эксперимент). $H = 300$ мм; $D = 60$ мм; $p_{Ar} = 0,1$ Торр; $f = 8$ МГц.

На рис. 6 приведены зависимости КПД индуктивной катушки $\eta_{coil} = 1 - P_{coil}/P$ от мощности лампы P , рассчитанные для лампы диаметром 60 мм, работающей на частоте разрядного тока $f = 8$ МГц с индуктивными катушками с разным числом витков: $n = 1, 2$ и 3. Видно, что с увеличением мощности лампы КПД катушки «быстро» возрастает на относительно малых мощностях $P = 20\text{—}40$ Вт, а на больших мощностях лампы $P > 80\text{—}120$ Вт асимптотически приближается к максимальной величине $(\eta_{coil})_{max}$, увеличивающейся с возрастанием числа витков от 0,88 ($n = 1$) до 0,96 ($n = 3$). Как показали экспериментальные исследования в широком диапазоне частот разрядного тока f , увеличение числа витков катушки $n > 3$ незначительно повышает ее максимальный КПД.

На рис. 7 приведены рассчитанная и экспериментальная зависимости КПД катушки η_{coil} от частоты разрядного тока f индукционной лампы длиной $H = 300$ мм и диаметром $D = 50$ мм, работающей с 8-витковой индуктивной катушкой на относительно большой мощности лампы $P = 160$ Вт. Видно, что на относительно малых частотах $f = 0,5\text{—}1,5$ МГц КПД катушки быстро возрастает

от 0,65 до 0,9, а затем медленно увеличивается, асимптотически приближаясь на частотах $f > 3$ МГц к своему максимальному значению $(\eta_{coil})_{max} = 0,975$.

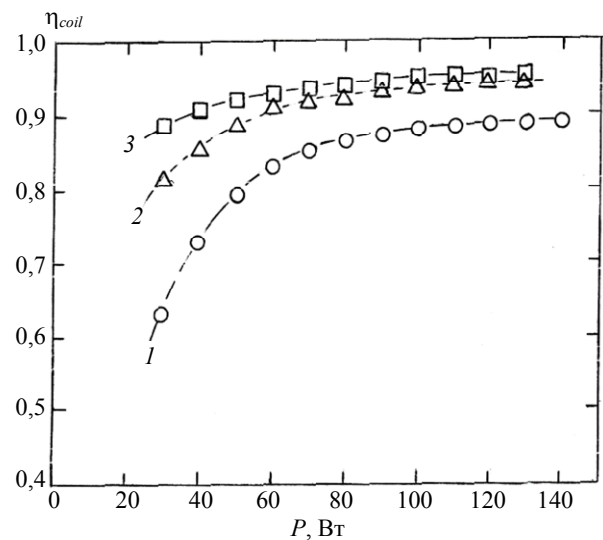


Рис. 6. Зависимость КПД индуктивной катушки η_{coil} от мощности лампы P . Параметры лампы, как на рис. 5. Число витков катушки для кривой 1 — $n = 1$, 2 — $n = 2$, 3 — $n = 3$.

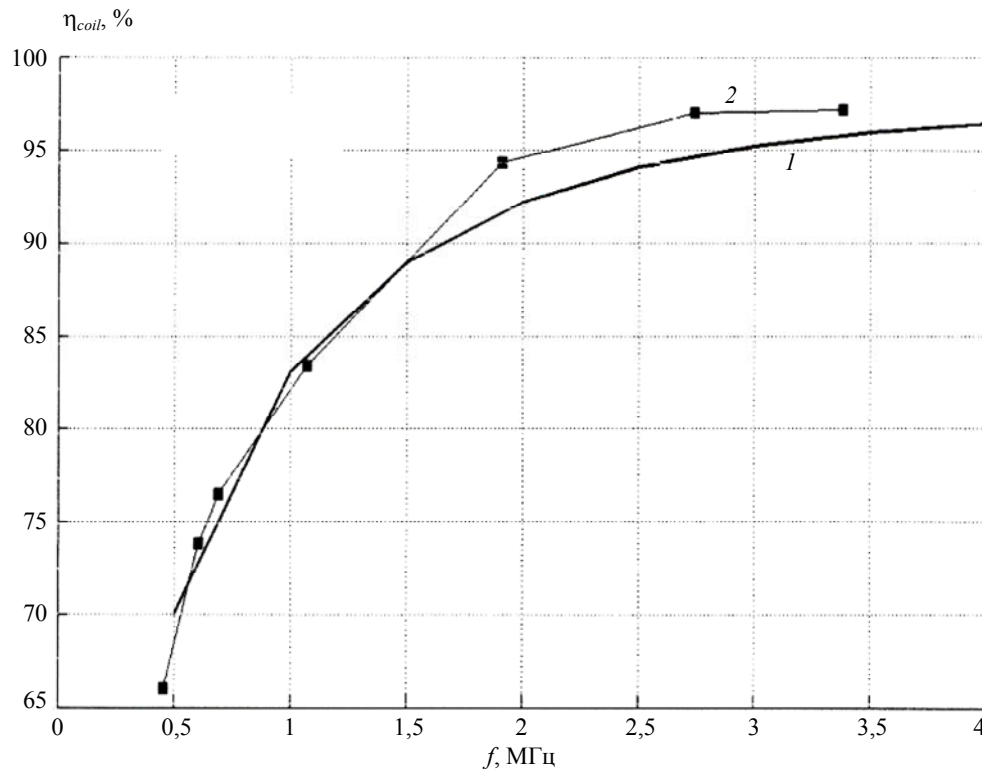


Рис. 7. Зависимость КПД индуктивной катушки η_{coil} от частоты разрядного тока f . Кривая 1 — расчет, кривая 2 — эксперимент. $H = 300$ мм; $D = 50$ мм, $p_{Ar} = 0,1$ Торр; $n = 8$; $P = 160$ Вт.

Заметим, что увеличение числа витков катушки приводит к практически линейному росту ВЧ-напряжения на ней, а именно, $U_{coil} = U_{pl}n/k^{1/2} = E_{pl}\Delta_{pl}n/k^{1/2}$. В результате в индукционных лампах с катушкой с большим числом витков $n > 10$ величина U_{coil} может превышать 1 кВ.

Влияние давления инертного газа на электрические параметры индуктивной катушки

На рис. 8 приведены рассчитанные по модели индукционного разряда [3] зависимости мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P для давлений аргона $p_{Ar} = 0,1$; $0,3$ и $0,6$ Торр. Расчеты проводились для лампы с разрядной трубкой длиной $H = 300$ мм и диаметром $D = 60$ мм, работающей с 2-витковой индуктивной катушкой на частоте $f = 9,5$ МГц. Видно, что зависимости имеют минимум, положение которого с уменьшением давления аргона от $0,6$ до $0,3$ Торр практически не меняется и остается в пределах $P_{min} = 53$ — 55 Вт. И только лишь снижение давления аргона до $0,1$ Торр сдвигает минимум в сторону меньших

мощностей лампы $P_{min} = 40$ — 43 Вт. Значение мощности потерь в катушке в минимуме $(P_{coil})_{min}$ также слабо меняется с изменением давления аргона, снижение которого от $0,6$ до $0,1$ Торр повышает $(P_{coil})_{min}$ всего на 15 %: от $3,9$ Вт ($0,6$ Торр) до $4,5$ Вт ($0,1$ Торр).

Незначительное уменьшение мощности потерь в проводе катушки P_{coil} в результате повышения давления аргона связано, возможно, со слабой в этой области давлений зависимостью напряженности электрического ВЧ-поля в плазме $E_{pl} = E_a[(1+(\omega/v_e)^2)]^{1/2}$ от давления аргона [4, 16]. Как видно из рис. 8, «скорость» возрастания P_{coil} с увеличением P тем выше, чем выше давление аргона, в результате чего при определенной мощности лампы P две «соседние» зависимости пересекаются. Это приводит к тому, что в зависимости P_{coil} от давления аргона p_{Ar} образуется минимум, сдвигающийся с увеличением мощности лампы (плазмы) в сторону меньших значений p_{Ar} . Аналогичную зависимость имеет от давления аргона напряженность электрического поля в плазме низкого давления в смеси паров ртути и инертного газа [5, 16].

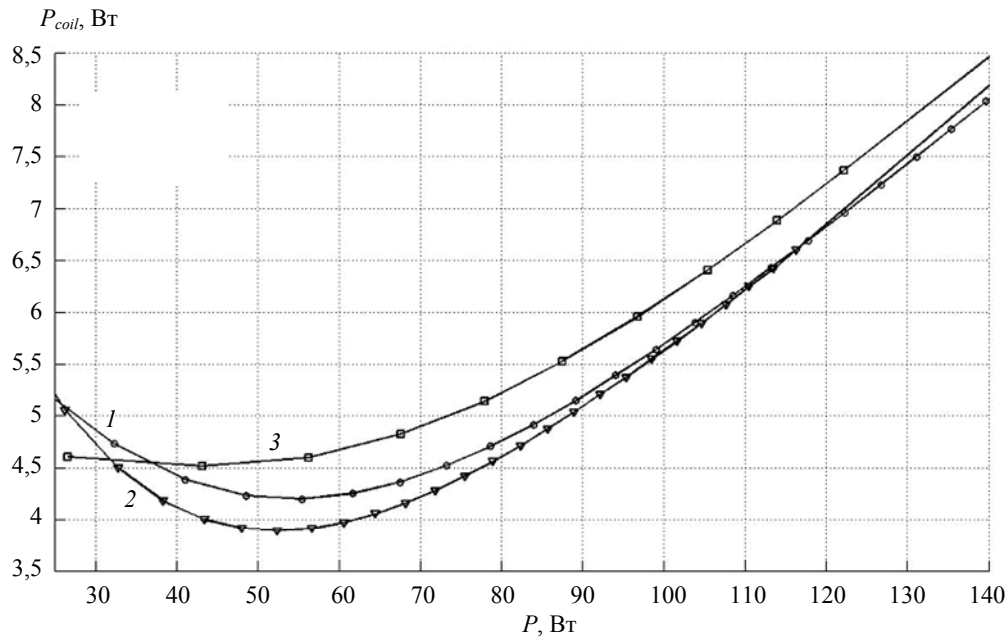


Рис. 8. Зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P для различных давлений аргона: кривая 1 — $p_{Ar} = 0,3$ Торр; 2 — $p_{Ar} = 0,6$ Торр, 3 — $p_{Ar} = 0,1$ Торр. $H = 300$ мм; $D = 60$ мм; $n = 2$; $f = 9,5$ МГц.

Таким образом, повышение рабочей мощности индукционной лампы сдвигает минимум в зависимости мощности потерь в проводе катушки от давления аргона в сторону меньших давлений. В частности, в лампе, работающей на мощности $P = 80$ Вт, минимум потерь в катушке (4,5 Вт) достигается при $p_{Ar} = 0,6$ Торр, а в той же лампе, работающей на мощности $P = 140$ Вт минимум потерь в катушке (8 Вт) достигается при давлении $p_{Ar} = 0,3$ Торр. В то же время, в силу малости относительных значений мощности потерь в проводе катушки P_{coil} , ее КПД при всех трех давлениях аргона даже на малых мощностях лампы $P = 30$ —40 Вт различается на 1 %: 0,88 (0,1 Торр) и 0,89 (0,6 Торр).

Поскольку КПД генерации УФ-излучения лампы $\eta_{y\phi}$ есть произведение КПД катушки η_{coil} и КПД генерации УФ-излучения плазмой индукционного разряда η_{pl} [1, 4], т. е. справедлива формула:

$$\eta_{y\phi} = \eta_{coil} \eta_{pl} \quad (8)$$

то для достижения максимального $\eta_{y\phi}$ необходимо добиваться максимального значения η_{pl} , выражаемого соотношением:

$$\eta_{pl} = \Phi_{y\phi} / P_{pl}, \quad (9)$$

где $\Phi_{y\phi}$ — энергетический поток УФ-излучения ртутной плазмы на длинах волн 185 и 254 нм.

Уменьшение давления аргона ниже 0,1 Торр повышает напряженность электрического ВЧ-поля в плазме E_a [4, 16] и, следовательно, повышает КПД генерации УФ-излучения ртутной плазмы

индукционного разряда η_{pl} [4]. Однако, уменьшать давление аргона ниже 0,05 Торр нецелесообразно, так как ухудшаются условия зажигания индукционного разряда, а именно, существенно возрастают пусковой ток в катушке и ВЧ-напряжение на ней [17].

Заключение

Приведем основные результаты исследования электрических параметров индуктивной катушки, возбуждающей индукционный разряд на частотах $f = 0,5$ —12,0 МГц и мощностях $P = 25$ —160 Вт в смеси паров ртути ($p_{Hg} \approx 10^{-2}$ Торр) и аргона ($p_{Ar} = 0,1$ —0,6 Торр) в цилиндрической трубке длиной $H = 300$ мм и диаметром $D = 40, 50, 60$ и 70 мм.

- Зависимости тока катушки I_{coil} и мощности потерь в ней P_{coil} от мощности лампы P имеют минимум, сдвигающийся с увеличением диаметра трубки D , частоты разрядного тока f и числа витков катушки n в сторону меньших мощностей лампы.

- Зависимость мощности потерь в катушке P_{coil} от частоты разрядного тока f имеет минимум, сдвигающийся с увеличением мощности лампы P в сторону меньших частот.

- Увеличение числа витков в индуктивной катушке n вызывает уменьшение тока катушки I_{coil} и мощности потерь в проводе катушки P_{coil} .

- Зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от давления аргона p_{Ar} имеет минимум, сдвигающийся в сторону низких давлений с увеличением мощности лампы P .

- КПД индуктивной катушки η_{coil} растет с увеличением мощности лампы P тем «быстрее», чем больше диаметр трубки, давление аргона и частота разрядного тока f и асимптотически приближается к максимальной величине $(\eta_{coil})_{max}$, определяемой числом витков катушки n .

- Максимальный КПД индуктивной катушки практически не зависит от диаметра трубки D , давления аргона p_{Ar} и частоты разрядного тока f , но возрастает с увеличением числа витков катушки n , асимптотически приближаясь к 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов О. А. // ЖТФ. 2007. № 6. С. 74.
2. Попов О. А., Chandler R. T., Maya J. // Light and Engineering. 2007. No. 5. P. 98.
3. Попов О. А., Свитнев С. А. // Светотехника. 2010. № 3. С. 63.
4. Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко В. А. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 92.

5. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Калязин Ю. Ф., Кокинов А. М., Мальков М. А. // Светотехника. 2005. № 3. С. 4.
7. Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 76.
8. Piejak R., Godyak V. A., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. No. 1. P. 179.
9. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
10. Reed T. B. // J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 821.
11. Александров А. Ф., Вавилин К. В., Кралькина Е. А. и др. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 34.
12. Попов О. А., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. No. 9. P. 227.
13. Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 103.
14. Попов О. А., Чандлер Р. Т. // Теплофизика высоких температур. 2007. № 4. С. 795.
15. Свитнев С. А., Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 110.
16. Piejak R., Godyak V. A., Alexandrovich B. M. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. No. 7. P. 3590.
17. Попов О. А., Атаев А. Е. // Вестник МЭИ. 2015. № 4. С. 67.

Characteristics of ferrite-free low pressure inductively-coupled discharge Part I. Induction coil electrical characteristics

S. A. Svitnev¹, O. A. Popov², V. A. Levchenko^{1,3}, and P. V. Starshinov²

¹NPO LIT

44/1 Krasnobogatyrskaya str. Moscow, 107076, Russia
E-mail: svitnevs@yandex.ru

²Moscow Power Engineering Institute

14 Krasnokazarmennaya str. Moscow, 111250, Russia
E-mail: olegpopov734@yahoo.com

³Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia
E-mail: mscoff@mail.ru

Received March 11, 2016

Ferrite-free inductively-coupled discharges were ignited at a frequency of $f = 0.5\text{--}12.0$ MHz and RF power of $P = 25\text{--}160$ W in the mixture of mercury vapor (0.01 Torr) and argon (0.1—0.6 Torr) in cylindrical tubes of $H = 300$ mm in length and of $D = 40, 50, 60$ and 70 mm in diameter. Discharges were excited with the help of an induction coil wrapped around the discharge tube along its axial periphery. Coil current I_{coil} and coil power losses P_{coil} dependences from discharge power P were found to have the minimum that shifted to lower discharge powers as discharge tube diameter, driving frequency, and coil turn number were increased. The dependences of P_{coil} from f had the minimum that shifted to lower driving frequencies as lamp power P increased. Coil power efficiency η_{coil} grew as lamp power, tube diameter, driving frequency, argon pressure, and coil turn number increased. The results of the coils electrical parameters calculations were in good agreement with the experimental data.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Keywords: inductively-coupled discharge, low pressure mercury plasma, induction coil, power losses, plasma Q factor, skin effect.

REFERENCES

1. O. A. Popov, *Tech. Phys.* **77** (6), 74 (2007).
2. O. A. Popov, R. T. Chandler, and J. Maya, *Light and Engineering*, No. 5, 98 (2007).
3. O. A. Popov and S. A. Svitnev, *Svetotekhnika*, No. 3, 63 (2010).
4. S. A. Svitnev, O. A. Popov, and V. A. Levchenko, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 92 (2015).
5. G. N. Rokhlin. *Discharge Light Sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
6. Y. F. Kalyazin, A. M. Kokinov, and M. A. Mal'kov, *Svetotekhnika*, No. 3, 4 (2005).
7. O. A. Popov. *Vestnik MEI*, No. 3, 76 (2013).
8. R. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich. *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 179 (1992).
9. Y. P. Raiser. *Gaseous Discharge Physics* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
10. T. B. Reed. *J. Appl. Phys.* **32**, 821 (1961).
11. A. F. Aleksandrov, K.V. Vavilin, E.A.Kralkina, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 34 (2015).
12. O. A. Popov and J. Maya, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 227 (2000).
13. O. A. Popov, *Vestnik MEI*, No. 5, 103 (2013).
14. O. A. Popov and R. T. Chandler, *High Temp.* **4**, 795 (2007).
15. S. A. Svitnev and O. A. Popov, *Vestnik MEI*, No. 3, 110 (2012).
16. R. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich. *J. Appl. Phys.* **7**, 3590 (2001).
17. O. A. Popov and A. Y. Ataev, *Vestnik MEI*, No. 4, 67 (2015).