

УДК 537.523.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

М. В. Исупов, А. Ю. Литвинцев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

E-mails: isupovmikhail@yandex.ru, artemlitvincev@yandex.ru

Исследуется генерация индукционного разряда атмосферного давления с ферромагнитным усилением магнитной связи между индуктором и разрядом. Показано, что увеличение интенсивности магнитного потока, связывающего индуктор и плазму, позволяет эффективно генерировать безэлектродный разряд в низкочастотном ($10 \div 100$ кГц) диапазоне и существенно упрощает применение индуктивно связанной плазмы. Представлены новые экспериментальные данные о зависимости напряженности электрического поля и теплового КПД низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления от силы тока разряда и расхода плазмообразующего газа (аргона, воздуха). Показана взаимосвязь критерия генерации низкочастотного индукционного разряда и его теплового КПД, проанализированы методы уменьшения тепловых потерь низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления.

Ключевые слова: индуктивно связанная плазма, индукционный разряд, электрическая дуга, плазмотрон.

DOI: 10.15372/PMTF20210408

Введение. Интерес к исследованию индуктивно связанной плазмы (ИСП) атмосферного давления во многом обусловлен перспективами ее применения в промышленности для генерации высокоэнтальпийных потоков газов и реализации различных плазмохимических процессов (синтез материалов, пиролиз, модификация поверхности и т. д.). Однако высокая частота генерации индукционных разрядов (порядка $1 \div 10$ МГц) существенно затрудняет их применение ввиду необходимости использования специализированных высокочастотных генераторов. Уменьшение частоты генерации ИСП до значений порядка $10 \div 100$ кГц позволило бы упростить конструкцию источников питания, в частности, использовать широко распространенные генераторы для индукционного нагрева металлов. Существенно (на несколько порядков) уменьшить частоту тока индукционных разрядов можно путем использования замкнутых ферромагнитных сердечников для усиления магнитного потока, связывающего индуктор и плазму [1]. При данном способе генерации ИСП газовый разряд представляет собой замкнутый тороидальный плазменный виток, являющийся нагрузкой электрического трансформатора. В работе [1] впервые сформулированы критерии генерации низкочастотной ИСП, определяющие зависимость размера ферромагнитного сердечника “плазменного” трансформатора от электрических характеристик разряда, частоты и индукции магнитного поля в сердечнике. Также в [1] впервые экспериментально исследованы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН (номер государственной регистрации 121031800218-5).

© Исупов М. В., Литвинцев А. Ю., 2021

дованы электрические характеристики низкочастотного индукционного разряда в аргоне при частоте тока 9,6 кГц, мощности разряда до 12 кВт и давлении аргона до 80 кПа. Однако в [1] не удалось достичь атмосферного давления плазмообразующего газа вследствие возникновения и усиления с увеличением давления неустойчивостей тороидального низкочастотного индукционного разряда. Аналогичные экспериментальные исследования низкочастотной ИСП в аргоне выполнены при частоте тока 8 кГц в работе [2], в которой также отмечался срыв генерации безэлектродного разряда при давлении аргона $p_{\text{Ar}} \approx 80$ кПа и предполагалось, что реализуется тококонвективный механизм развития неустойчивости контрагированного тороидального плазменного витка. Влияние неустойчивостей на электрические характеристики низкочастотной ИСП исследовано в [3] для разрядов в чистом аргоне и смесях Ar-O_2 , Ar-N_2 при частоте тока порядка 300 кГц, мощности разряда до 8 кВт и давлении плазмообразующего газа $p \leq 85$ кПа. Проблема подавления неустойчивостей низкочастотной ИСП решена в работе [4] за счет применения вихревой стабилизации разряда. Это позволило впервые получить стабильный низкочастотный индукционный разряд при атмосферном давлении аргона и воздуха, частоте тока 10 кГц и мощности разряда до 100 кВт. Заметим, что при использовании вихревой стабилизации тороидального низкочастотного индукционного разряда на выходе из безэлектродного плазмотрона обнаружена сверхравновесная концентрация монооксида азота NO, возникшая без применения закалочных устройств [5]. Для объяснения обнаруженного эффекта предложена физическая модель “автозакалки” концентрации NO при вихревом движении плазмы в водоохлаждаемой тороидальной газоразрядной камере. Также низкочастотный индукционный разряд атмосферного давления использован для высокотемпературного восстановления тетраоксида кремния с целью получения кремния [6] и окисления хлоридов металлов (SiCl_4 , TiCl_4 , ZrCl_4) с целью получения нанодисперсных порошков оксидов металлов [7].

Обзор указанных работ показывает, что низкочастотные индукционные плазмотроны, в частности энергетический баланс разрядов данного типа, слабо изучены. Следует отметить, что в отличие от разрядов атмосферного давления низкочастотная ИСП низкого давления исследована более подробно, ввиду ее применения в светотехнике [8–11], а в перспективе — в полупроводниковой промышленности с целью создания устройств для ионно-плазменной обработки больших поверхностей (см. работу [11] и библиографию к ней).

Целями настоящей работы являются получение новых экспериментальных данных об электрических и энергетических характеристиках низкочастотной ИСП атмосферного давления и анализ особенностей генерации данных разрядов.

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, схема которой показана на рис. 1. Тороидальная газоразрядная камера установки состоит из шести водоохлаждаемых медных секций, электрически изолированных друг от друга. Внутренний диаметр газоразрядной камеры равен 40 мм, периметр камеры — 80 см. Плазмообразующие газы (аргон, воздух) для вихревой стабилизации разряда подавались во входную секцию камеры через тангенциальный канал. Минимальный расход газа, при котором достигалась стабилизация разряда, составлял приблизительно 30 л/мин. Аналогичные значения минимального расхода газа получены в работе [4]. Через выходную секцию камеры нагретый газ поступал в плазмохимический реактор (не показан на рис. 1). На газоразрядной камере установлены два ферритовых сердечника с суммарной площадью 64 см² с первичными обмотками. Первичные обмотки через блок согласования (перестраиваемую LC-цепь) подсоединены к источнику питания с частотой тока 100 кГц, выходным напряжением 500 В и полной мощностью 100 кВт·А. Вследствие того что соединение первичных обмоток проводилось по различным схемам, значение коэффициента трансформации напряжения варьировалось в диапазоне 0,5 ÷ 1,0, что позво-

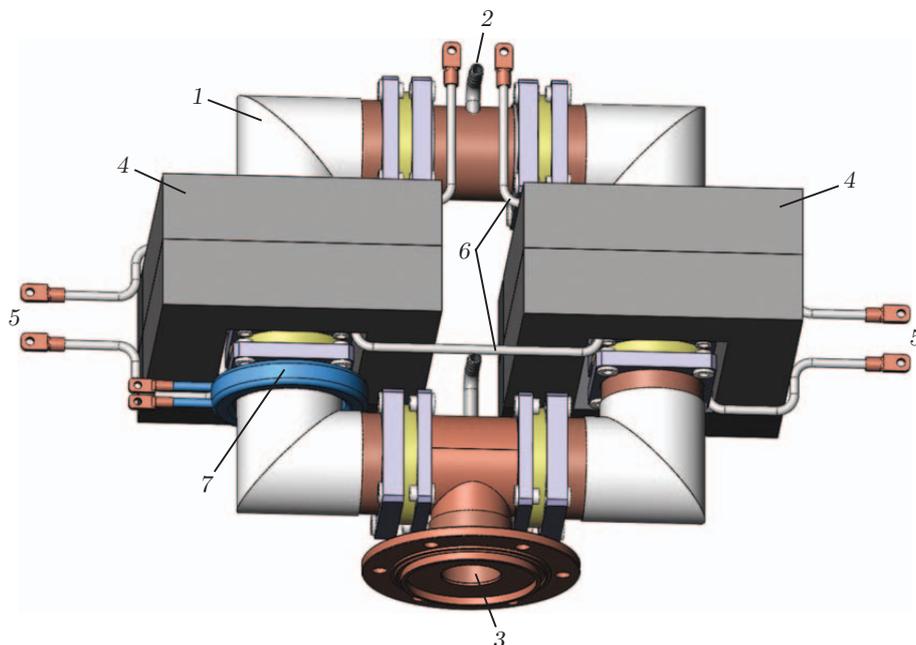


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — газоразрядная камера, 2 — входная секция, 3 — выходная секция, 4 — ферритовый сердечник, 5 — первичная обмотка, 6 — измерительный виток, 7 — трансформатор тока

ляло устройству работать при повышенных значениях напряжения разряда ($U > 500$ В). Для измерения напряжения разряда использовался виток провода, охватывающий сечения магнитопроводов по периметру тороидальной газоразрядной камеры. Для измерения силы тока разряда I использовался трансформатор тока. Аналогичные методы измерения электрических характеристик низкочастотной ИСП применялись в работах [2–7]. Поскольку значение коэффициента мощности “плазменного” трансформатора [11] велико ($\cos \varphi \approx 1$), мощность низкочастотной ИСП можно определить как произведение измеренных среднеквадратичных значений силы тока и напряжения разряда: $P = IU$. Тепловые потери через стенку газоразрядной камеры P_T измерялись с помощью калориметрирования охлаждающей жидкости.

Для инициации низкочастотного индукционного разряда газ в газоразрядной камере откачивался до давления порядка 10 Па, с помощью вспомогательного тлеющего разряда газ предварительно ионизировался. После инициации разряда проводилось заполнение камеры плазмообразующим газом до достижения атмосферного давления.

Критерий генерации разряда. Рассмотрим более детально процесс генерации низкочастотной ИСП. Сила тока разряда поддерживается за счет вихревого электрического поля \mathbf{E} , индуцируемого переменным магнитным потоком Φ_c в сердечнике. Критерием генерации разряда является равенство напряжения разряда и индуцированного напряжения [1]:

$$\oint_{L_d} \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_c}{\partial t} = i\omega B_c e^{-i\omega t} S_c, \quad (1)$$

где L_d — замкнутый контур разряда; ω — круговая частота; B_c — магнитная индукция в сердечнике; S_c — площадь сечения сердечника. При данном способе генерации ИСП разряд ориентирован вдоль оси тороидальной газоразрядной камеры, что обуславливает сходство между низкочастотной ИСП и дуговыми разрядами в длинных цилиндрических трубках.

Поскольку практически весь магнитный поток сосредоточен в сердечнике “плазменного” трансформатора, интеграл по контуру разряда (1) равен напряжению U , измеряемому с помощью витка провода (см. рис. 1). При отсутствии нестабильностей, искажающих форму газоразрядного канала, длина этого канала L_d , как правило, равна периметру тороидальной газоразрядной камеры L . Это позволяет вычислить напряженность электрического поля разряда по измеренному напряжению и известным геометрическим характеристикам камеры: $E = U/L$. Уравнение (1) связывает электрические характеристики низкочастотной ИСП, геометрические характеристики газоразрядной камеры и сердечника и параметры переменного магнитного поля в сердечнике. В свою очередь, зная величины ω и B_c , можно определить тепловые потери в сердечнике “плазменного” трансформатора:

$$P_c = k\omega^a B_c^b V_c. \quad (2)$$

Здесь V_c — объем сердечника; k , a , b — коэффициенты Штейнмеца, характеризующие удельные тепловые потери на перемагничивание. Для различных ферромагнитных материалов показатели степени равны $a = 1 \div 2$, $b = 2 \div 3$. С учетом (1) выражение (2) записывается в виде

$$P_c = \frac{kV_c E^b L^b}{\omega^{b-a} S_c^b}, \quad (3)$$

где $b - a > 0$; $V_c \sim S_c L_c$; L_c — периметр сердечника. Из выражения (3) следует, что тепловые потери в сердечнике быстро увеличиваются при увеличении напряженности электрического поля разряда и длины газоразрядной камеры и уменьшаются при увеличении частоты тока и площади сечения сердечника. Таким образом, изучение электрических характеристик низкочастотной ИСП имеет большое значение для расчета геометрических характеристик сердечника и газоразрядной камеры с целью минимизации тепловых потерь в сердечнике.

Результаты экспериментов и их обсуждение. На рис. 2 приведены измеренные вольт-амперные характеристики низкочастотного индукционного разряда атмосферного

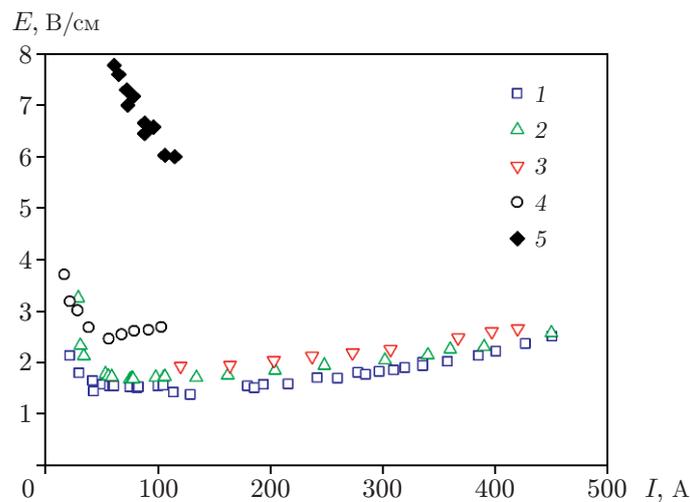


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления в аргоне (1–4) и воздухе (5) от силы тока разряда при различных значениях расхода газа: 1 — $G_{Ar} = 45$ л/мин, 2 — $G_{Ar} = 90$ л/мин, 3 — $G_{Ar} = 180$ л/мин, 4 — $G_{Ar} = 10$ л/мин [3], 5 — $G_{Air} = 60$ л/мин

давления в аргоне и воздухе (приведены действующие значения величин силы тока и напряженности электрического поля). Для сравнения представлены результаты работы [3]. Поведение вольт-амперных характеристик низкочастотной ИСП аналогично поведению характеристик дуговых разрядов. Увеличение напряженности электрического поля низкочастотной ИСП при значениях силы тока разряда $I > 100$ А обусловлено, по-видимому, ограничением диаметра канала разряда стенками газоразрядной камеры. Минимальная напряженность электрического поля для разряда в аргоне достигается при $I \approx 50$ А и составляет 1,5 В/см при расходе аргона $G_{Ar} \approx 45$ л/мин. С увеличением расхода аргона до 180 л/мин напряженность электрического поля E возрастает до 1,9 В/см. Величина E , определенная в работе [3], также достигает минимума при $I \approx 50$ А, однако имеет более высокое значение (2,5 В/см). Следует отметить, что в [3] измерения проводились при относительно малом расходе газа (до 10 л/мин) и наличии нестабильностей разряда ($L_d > L$). Следовательно, при использовании для расчета формулы $E = U/L$ значения напряженности поля могут быть завышены.

В работе [4] $E \approx 1,1$ В/см для разряда в аргоне, что существенно меньше, чем в работе [3]. Кроме того, измеренное для низкочастотной ИСП в воздухе при $I \approx 85$ А значение $E \approx 4,3$ В/см [4] также приблизительно в 1,5 раза меньше значения E , полученного в результате выполненных измерений (6,7 В/см). Наблюдаемое различие значений напряженности электрического поля при стабильной генерации низкочастотной ИСП может быть обусловлено увеличенным приблизительно в 1,8 раза диаметром газоразрядной камеры [4] (73 мм). Известно, что напряженность электрического поля дуговых разрядов уменьшается при увеличении диаметра газоразрядной камеры [1, 12]. Поскольку даже при незначительном уменьшении величины E существенно уменьшаются потери в сердечнике (3), использование газоразрядных камер большого диаметра более предпочтительно для создания низкочастотных индукционных плазмотронов.

Несмотря на то что диаметр газоразрядной камеры, расход газа и сила тока разряда оказывают влияние на величину E , основным определяющим фактором остается состав плазмообразующего газа. Так, при переходе от аргона к воздуху значительно (в четыре раза) увеличивается значение E (см. рис. 2), соответственно на порядок увеличивается величина тепловых потерь в сердечнике. В частности, в [4] отмечается, что при переходе от аргона к воздуху значение P_c увеличивается с 3 до 35 % мощности трансформаторного плазмотрона. Для уменьшения тепловых потерь в сердечнике при больших значениях напряжения разряда необходимо увеличивать частоту тока разряда и площадь сечения сердечника (3). Максимальный размер сердечника ограничен площадью внутреннего отверстия тороидальной газоразрядной камеры, в то время как частота тока разряда может изменяться в существенно более широком диапазоне. В то же время существенное увеличение частоты тока разряда противоречит основной цели использования низкочастотной ИСП — уменьшению частоты генерации индукционного разряда за счет применения ферромагнитных сердечников. По мнению авторов данной работы, в этом случае использование частоты тока $f \approx 100$ кГц является компромиссом: данное значение на два порядка меньше стандартной частоты генерации ИСП (13,56 МГц), при этом источники питания с частотой тока $f \approx 100$ кГц широко используются на практике для индукционного нагрева. Применяя специализированные ферромагнитные материалы с низким уровнем удельных тепловых потерь при $f \approx 100$ кГц, тепловые потери P_c можно уменьшить до значений, составляющих менее 10 % мощности низкочастотной ИСП даже при генерации плазмы воздуха.

Мощность $P = UI$ низкочастотного индукционного разряда расходуется на тепловые потери через стенку газоразрядной камеры P_T и вместе с потоком газа передается в плазмохимический реактор: $P = P_T + P_J$. Соответственно энергетические характери-

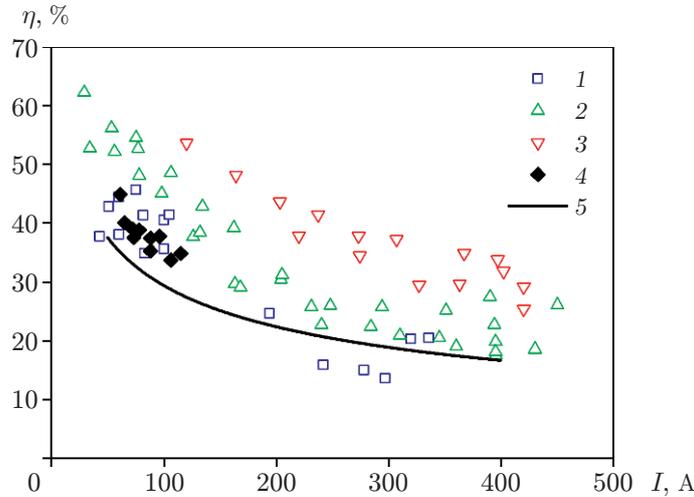


Рис. 3. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости теплового КПД низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления от силы тока разряда при различных значениях расхода газа:
 1–3 — аргон, 4, 5 — воздух; 1 — $G_{Ar} = 45$ л/мин, 2 — $G_{Ar} = 90$ л/мин, 3 — $G_{Ar} = 180$ л/мин, 4, 5 — $G_{Air} = 60$ л/мин

ки трансформаторного плазмотрона можно описать с помощью коэффициента тепловых потерь $\psi = P_T/P_J$ и теплового КПД $\eta = P_J/P$, связанных выражением

$$\eta = (1 + \psi)^{-1}. \tag{4}$$

Анализ энергетических характеристик дуговых плазмотронов, выполненный с использованием критериев подобия дуговых разрядов, позволяет получить обобщенное уравнение для коэффициента тепловых потерь разряда в воздухе [12]:

$$\psi = 1,08 \cdot 10^{-4} \left(\frac{I^2}{GD}\right)^{0,27} \left(\frac{G}{D}\right)^{-0,27} \left(\frac{L_k}{D}\right)^{0,5} (pD)^{0,3}, \tag{5}$$

где p — давление воздуха, Па; G — расход воздуха, кг/с; L_k , D — длина и диаметр газоразрядной камеры, м. Из уравнения (5) следует, что коэффициент тепловых потерь увеличивается с увеличением силы тока разряда и длины газоразрядной камеры по законам $I^{0,54}$, $L_k^{0,5}$ и уменьшается с увеличением расхода газа и диаметра камеры по законам $G^{-0,54}$, $D^{-0,2}$. Показатели степеней в уравнении (5) для разряда в аргоне отличаются от показателей степеней для разряда в воздухе, однако общие закономерности такие же. На рис. 3 показаны измеренные зависимости теплового КПД низкочастотной ИСП от силы тока разряда для различных расходов плазмообразующих газов. Для сравнения показана зависимость $\eta(I)$, рассчитанная по формулам (4), (5) для воздуха. Следует отметить, что при расчете по формуле (5) в качестве величины L_k использовалась половина длины тороидальной газоразрядной камеры L , а в качестве величины G — половина общего расхода газа в трансформаторном плазмотроне. Это обусловлено тем, что в трансформаторном плазмотроне входящий газовый поток разделяется на два независимых потока, движущихся по двум равным “плечам” тороидальной газоразрядной камеры (см. рис. 1). На рис. 3 видно, что тепловой КПД низкочастотной ИСП уменьшается с ростом силы тока разряда и увеличивается с увеличением расхода газа. При этом для воздуха экспериментально измеренные и рассчитанные значения теплового КПД согласуются достаточно хорошо. Это свидетельствует о сходстве тороидального плазменного витка низкочастотного индукционного разряда и дугового разряда в длинной цилиндрической трубке. Однако в

отличие от случая дуговых разрядов размеры газоразрядной камеры низкочастотной ИСП не могут быть выбраны произвольно, а определяются электрическими характеристиками разряда, частотой тока и индукцией магнитного поля в сердечнике [1].

Для анализа взаимосвязи размеров газоразрядной камеры, электрических характеристик разряда и параметров сердечника рассмотрим модель низкочастотного индукционного разряда, предложенную в [1]: тороидальная камера с диаметром газоразрядной трубки D вплотную прилегает к круглому ферромагнитному сердечнику диаметром D_c , разряд проходит по оси трубки. В этом случае длина плазменного витка определяется из выражения $L_d = \pi(D + D_c)$, а критерий генерации разряда (1) преобразуется к виду (для действующих значений величин)

$$(D + D_c)E = \omega B_c D_c^2 / 4. \quad (6)$$

Данная модель позволяет определить минимальный размер ферромагнитного сердечника, необходимый для поддержания генерации низкочастотного индукционного разряда.

В области низких частот ($f < 1000$ Гц), анализируемых в работе [1], необходимо учитывать, что плазма затухает, когда мгновенное значение силы тока разряда близко к нулю, и это накладывает дополнительные ограничения на диаметр газоразрядной камеры. В работе [1] с использованием критерия стационарности плазмы $\omega\tau \geq 10$ и выражения для характерного времени охлаждения плазмы $\tau = D^2 / (4K\lambda^2)$ (λ — первый нуль функции Бесселя; K — температуропроводность газа) определен диаметр газоразрядной камеры как функция круговой частоты тока $D(\omega) \sim \omega^{-1/2}$. При значениях частоты тока $f \approx 100$ кГц затуханием плазмы можно пренебречь, поэтому в отличие от работы [1] диаметр газоразрядной камеры будем рассматривать как независимый варьируемый параметр.

Решая уравнение (6), получаем выражение для диаметра сердечника, необходимого для поддержания горения низкочастотного индукционного разряда:

$$D_c = 2 \frac{E + (E^2 + \omega B_c E D)^{1/2}}{\omega B_c}. \quad (7)$$

Соответствующая данному диаметру сердечника длина газоразрядной камеры $L = \pi(D + D_c)$ определяет коэффициент тепловых потерь разряда $\psi \sim L^{0,5}$ (5). Для повышения эффективности трансформаторного плазмотрона необходимо уменьшение как коэффициента тепловых потерь низкочастотной ИСП, так и тепловых потерь в сердечнике. Этого можно достичь, увеличивая до максимума значение ωB_c при фиксированном значении удельных тепловых потерь в сердечнике ($\omega^a B_c^b = \text{const}$), что приводит к минимизации диаметра сердечника D_c (7) при одновременном уменьшении величины тепловых потерь P_c (2). Учитывая обратную зависимость напряженности электрического поля от диаметра газоразрядной камеры $E \sim D^{-\alpha}$ [1, 12], диаметр сердечника D_c можно уменьшить путем увеличения диаметра D . Однако в этом случае необходимо также минимизировать длину газоразрядной камеры $L = \pi(D + D_c)$ для минимизации коэффициента тепловых потерь разряда. Таким образом, задача оптимизации работы трансформаторного плазмотрона включает поиск не только оптимальной частоты и индукции магнитного поля в сердечнике, определяемых свойствами используемого ферромагнетика, но и оптимального диаметра газоразрядной камеры.

Заключение. Следует отметить, что низкочастотный индукционный разряд, генерируемый в тороидальной газоразрядной камере с помощью ферромагнитного сердечника, имеет свойства индукционного и дугового разрядов одновременно. Так, электрические и энергетические характеристики низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления совпадают с характеристиками дугового разряда, имеющего аналогичную геометрию газоразрядной камеры, силу тока разряда и расход плазмообразующего газа.

Принципиальным отличием низкочастотного индукционного разряда от дугового разряда является существование ограничения на минимальную площадь ферромагнитного сердечника, при которой возможно поддержание генерации низкочастотного индукционного разряда. Соответствующая данной площади сердечника минимальная длина газоразрядной камеры определяет верхний предел теплового КПД низкочастотного индукционного плазмотрона. Площадь сердечника, напряженность электрического поля низкочастотного индукционного разряда, частота и индукция магнитного поля в сердечнике связаны законом электромагнитной индукции. Поскольку напряженность электрического поля разряда зависит от диаметра газоразрядной камеры, минимальная длина газоразрядной камеры низкочастотного индукционного плазмотрона связана с ее диаметром. Таким образом, решение задачи минимизации тепловых потерь трансформаторного плазмотрона требует учета взаимосвязи между электрическими характеристиками разряда и геометрией газоразрядной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Eckert H. U.** Induction plasmas at low frequencies // AIAA J. 1971. V. 9, N 8. P. 1452–1456.
2. **Гольдфарб В. М., Донской А. В., Дресвин С. В., Резвов В. А.** Некоторые характеристики низкочастотного разряда в трансформаторном плазмотроне // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17, № 4. С. 698–702.
3. **Shabalin A.** High-pressure operation of a toroidal, inductively coupled discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 2004. V. 13, N 4. P. 588–593.
4. **Коган В. А., Уланов И. М.** Исследование возможности создания плазмотронов трансформаторного типа // Теплофизика высоких температур. 1993. Т. 31, № 1. С. 105–110.
5. **Колмаков К. Н., Уланов И. М., Предтеченский М. Р., Приходько В. Г.** Эффект “автозакалки” монооксида азота при вихревой стабилизации низкочастотного разряда трансформаторного типа // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7, № 3. С. 433–441.
6. **Уланов И. М., Исупов М. В., Литвинцев А. Ю., Мищенко П. А.** Трансформаторный плазмотрон — плазмохимический реактор // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 2. С. 175–180.
7. **Ulanov I. M., Isupov M. V., Litvinsev A. Y., Mischenko P.** Plasmachemical synthesis of oxide powders using transformer-coupled discharge // Plasma Sci. Technol. 2013. V. 15, N 4. P. 386–390.
8. **Попов О. А., Чандлер Р. Т.** Индуктивный источник света трансформаторного типа на частотах 150–400 кГц мощностью 200–500 Вт // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45, № 5. С. 795–800.
9. **Исупов М. В., Кротов С. В., Литвинцев А. Ю., Уланов И. М.** Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника. 2007. № 5. С. 37–40.
10. **Попов О. А., Атаев А. Е.** Исследование характеристик асимметричных осветительных ламп трансформаторного типа // Вестн. Моск. энерг. ин-та. 2017. № 1. С. 45–49.
11. **Godyak V.** Ferromagnetic enhanced inductive plasma sources // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. 283001.
12. **Zhukov M. F.** Thermal plasma torches: design, characteristics, application / M. F. Zhukov, I. M. Zasyupkin. Cambridge: Cambridge Intern. Sci. Publ., 2007.

*Поступила в редакцию 11/III 2021 г.,
после доработки — 25/III 2021 г.
Принята к публикации 29/III 2021 г.*