

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ГАЗА В БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ
ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ (ОБЗОР)

М. И. Якушин

(Москва)

Одно из первых упоминаний о высокочастотном безэлектродном разряде относится к 1884 году, когда в работе В. Хишторфа [1] было описано, что остаточный газ в вакуумной трубке, помещенной в соленоид, начинает светиться, как только через соленоид пропускается высокочастотный ток. Это явление В. Хишторф объяснил действием на газ магнитного поля соленоида и высказал мнение, что ток в разряде носит индукционный характер. Это явление было отмечено в работе О. Лермана [2], который объяснил возникающее свечение газа действием электрического поля, создаваемого витками соленоида.

Начало детального рассмотрения этого явления было положено лишь в последующих работах Дж. Дж. Томсона [3-4], опубликованных в 1926—1927 годах, показало, что основной причиной возникновения разряда служит магнитное поле соленоида. В этих работах была предложена теория безэлектродного разряда и, в частности, установлен критерий зажигания разряда.

В экспериментальной части своей работы Д. Томсон подтвердил, что безэлектродный разряд имеет индукционную природу.

Позже опыты Томсона были подвергнуты сомнению в работах Д. Таунсенда — Р. Дональдсона [5]. Авторы этих работ считали, что разряд вызван электрическим полем соленоида, и утверждали, что геометрия этого поля может обеспечить кольцевую форму разряда.

Дискуссия между Томсоном и Таунсендом привлекла к исследованию безэлектродного разряда многочисленных исследователей. В период 1929—1934 годов вопросами безэлектродного разряда занимались Мак Киннон [6], Книпп [7], Смит [8], Брейсфилд [9], Мирдель [10] и многие другие.

Статья Мак Киннона положила конец спору между Томсоном [4] и Таунсендом с Дональдсоном [5]. Мак Киннону удалось показать, что, в то время как в экспериментах Томсона имел место кольцевой высокочастотный Н-разряд, вызываемый переменным магнитным полем, в опытах Таунсенда — Дональдсона был аналогичный высокочастотный разряд, причем его индукционная природа маскировалась Е-разрядом, вызываемым электрическим полем соленоида. Мак Киннон повторил опыт Томсона и Таунсенда — Дональдсона и показал, что в экспериментальной установке последних были случайно созданы условия, облегчающие появление именно Е-разряда.

Эксперименты Брейсфилда [9] и Мирделя [10] были посвящены количественной проверке теории Томсона [4] возникновения высокочастотного разряда.

Были получены кривые зажигания безэлектродного высокочастотного разряда для ряда газов; O_2 , N_2 , N , Ar , Ne , He .

Полученные в этих экспериментах зависимости пробойного напряжения от давления подтвердили теоретические выводы теории Томсона.

Качественно новый этап в исследовании безэлектродного разряда был начат работой Г. И. Бабата [11]. Впервые была показана возможность введения при атмосферном давлении в поток газа индукционным безэлектродным методом мощностей порядка *квт*. Приведем основные параметры этих исследований: диаметр разрядных колб $60 \div 400$ мм, частота лампового генератора $f = 3 \div 62$ мГц, давление газа $p = 0.01 \div 760$ мм рт. ст., газ — воздух. Разряд создавался как в потоке газа, так и без него.

К сожалению, в этой установке разрядный канал, изготовленный из стекла и кварца, не имел надежной термозащиты и при больших мощностях мгновенно разрушался.

Г. И. Бабат обратил внимание на влияние аэродинамических характеристик на устойчивость безэлектродного разряда в потоке газа, а также обнаружил важное явление отрыва (контрагирование) безэлектродного разряда от стенок разрядной колбы при повышении давления.

В этой статье приводятся простые формулы для оценки электрических параметров колебательного контура, индуктора и безэлектродного высокочастотного разряда. Эта работа остается до сих пор единственной, где описаны возможные применения безэлектродных разрядов с полигональными (секционными) индукторами.

Работа Г. И. Бабата привлекала внимание специалистов за рубежом и в более подробном изложении была опубликована в 1947 году за границей [12].

Попытки практического использования безэлектродного разряда для ультрафиолетовой вакуумной спектроскопии описаны в работе Биркофа [13], где освещается вопрос о различных типах безэлектродных высокочастотных разрядов. В работе применялся ламповый генератор мощностью 2 *квт*, с частотой $f = 22.5 \div 61.5$ мГц и диаметр разрядной колбы 22 мм.

В работе Штрауса [14] исследовалось влияние разных газов на зажигание безэлектродного разряда. В качестве рабочих газов были использованы He, Ar, Kr, Ne, Xe, N₂, O₂, а также пары ртути и йода. Ламповый генератор отдавал мощность в разряд 1,3 *квт* при частоте 4 ÷ 8 *мгц*. Здесь была получена зависимость потенциала зажигания безэлектродного разряда от давления.

Большая работа Кабанна [15] посвящена исследованию безэлектродного разряда в Ar, Ne, Xe, Kr в диапазоне давлений 5·10⁻² ÷ 1·10² *мм рт. ст.* Мощность разряда составляла 0.15 ÷ 1.2 *квт*, диаметр разрядной колбы 30 ÷ 45 *мм* и частота лампового генератора изменялась в пределах 1 ÷ 2.9 *мгц*. Полученные экспериментальные зависимости пробойного напряжения от давления хорошо согласуются с результатами работы [9]. Показано, что геометрия разряда зависит от давления и что механизм теплоотвода из разряда при давлениях ниже 1 *мм рт. ст.* определяется диффузией электронов и рекомбинацией их на стенке, а при давлениях, превосходящих 10 *мм рт. ст.* — теплопроводностью. Измеренная концентрация электронов зондовым и спектральным методами совпала по порядку величин.

Теоретический анализ поведения различных аэродинамических и разрядных параметров в сверхзвуковом воздушном потоке низкой плотности с учетом диффузионных процессов рассмотрен Ромигом [16]. Получены необходимые условия для поддержания устойчивого состояния разряда в зависимости от максимума электронной плотности и электрического поля.

Некоторые аналитические исследования кольцевого разряда при низких давлениях были выполнены Эккертом [17-18]. Эккерт [17] рассмотрел применение теории Шоттки (положительного столба разряда) для описания высокочастотного разряда в условиях, когда частота столкновений превышает частоту поля. В [18] описан переход от свободной к амбиполярной диффузии в стационарном высокочастотном разряде и показано, что этот переход для водородного разряда в поле с соленоидальной геометрией будет неустойчивым.

В работах В. Н. Сошникова, Е. С. Трехова [19-21] излагается расчет высокочастотного вихревого разряда высокого давления ($p = 1$ *атм*), создаваемого в цилиндрическом соленоиде бесконечной длины. Задача формулируется в предположении термодинамического равновесия. В этих предположениях записаны уравнения Максвелла и теплопроводности с учетом потерь на излучение, которые решаются численным методом при произвольном задании напряженности магнитного поля и температуры на оси разряда. Результаты расчетов представлены кривыми радиальных распределений напряженностей электрического поля $E(r)$, магнитного поля $H(r)$, плотности тока $I(r)$, температуры $T(r)$ для аргона и воздуха в диапазоне температур 6000 ÷ 14 000° K и частоты поля 1.5 ÷ 100 *мгц*. Для каждого расчетного режима вычислены интегральные характеристики разряда; полная мощность в разряде, мощность излучения, индуктивное и омическое сопротивления плазмы, которые приведены в таблицах [19-21].

Работа В. А. Груздева, Р. Е. Ровинского, А. П. Соболева [22] посвящена аналогичной задаче для плотной плазмы, где геометрия разряда определяется теплопроводностью. Предположено локальное термодинамическое равновесие, когда все коэффициенты переноса представляют собой функции температуры и давления. Исходная система уравнений Максвелла и теплопроводности записана в следующих предположениях: поле, возбуждающее разряд, однородно вдоль оси разряда, плазма неподвижна, давление атмосферное постоянно, частота электромагнитного поля много больше характерного обратного времени релаксации плазмы, излучением пренебрегают

$$-\frac{\partial H}{\partial r} = \frac{4\pi}{c} \sigma E, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} rE = -\frac{\omega}{c} \frac{\partial H}{\partial \tau}, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r\lambda \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\sigma}{2\pi} \int_0^{2\pi} E^2(\tau) d\tau = 0$$

Здесь H , E — напряженности магнитного и электрического поля, λ — коэффициент теплопроводности, σ — коэффициент электропроводности, T — температура.

Краевая задача решается методом последовательных приближений. Граничные условия задаются из физических соображений на стенке разрядной камеры. Первое приближение, когда электропроводность плазмы считается ступенчатой функцией температуры, позволяет качественно исследовать явления, протекающие в индукционном разряде. Второе приближение использовано для численных расчетов мощности и отрыва разряда от стенки канала в аргоне. Получены кривые радиальных распределений напряженностей магнитного и электрического полей, плотности тока.

Р. Е. Ровинский, А. П. Соболев [23] рассмотрели выбор оптимального частотного диапазона стационарного индуктированного разряда, где анализ проводится на основе аналитических зависимостей [22]. Критерием оптимальности считается условие, наиболее благоприятное для получения в разряде заданной максимальной температуры. Приведенные [23] оценки показывают, что встречающиеся на практике частоты порядка нескольких *мгц* и выше не соответствуют оптимальным условиям.

Понижение рабочей частоты связано с увеличением скин-слоя и более равномерным заполнением плазмой центральной зоны разряда. Пропорционально частоте уменьшается напряженность электрического поля, что ухудшает условия поджига. В этом случае применяют два последовательно расположенных соленоида: поджигающий высокочастотный на 3,8 мГц и рабочий низкочастотный на 280 кГц [24].

Ю. П. Райзер [25] рассмотрел приближенную теорию высокочастотного безэлектродного разряда высокого давления ($p = 1 \text{ атм}$) в потоке газа. В первой части работы рассмотрена качественная картина безэлектродного высокочастотного разряда с учетом, что на формирование геометрии разряда существенно влияет не только теплопроводность, но и характер течения газового потока. Конкретно рассматривается тангенциальная подача газа в разрядную камеру, представляющую особый интерес для практики. При таком способе подачи газа в приосевой области реализуется медленное завихренное движение, а большая часть газа течет вдоль стенок разрядного канала. Такое течение предохраняет стенки разрядного канала от теплового воздействия плазмы и способствует хорошей стабилизации разряда.

Приведенные оценки для частоты 15 мГц показывают, что глубина скин-слоя, где происходит выделение джоулева тепла значительно меньше радиуса разряда. Это дает возможность рассматривать плоскую модель фронта разряда. Причем под фронтом разряда понимается изотерма T_0 , где T_0 — значение температуры, соответствующее условному скачкообразному изменению электропроводности σ . Считается, что при $T < T_0$ электропроводность пренебрежимо мала и выделение джоулева тепла практически не происходит. Фронт разряда рассматривается аналогично фронту горения. На основании уравнений Максвелла и баланса энергии

$$\rho_0 u c_p \frac{dT}{dx} = - \frac{dJ}{dx} + \sigma \langle E^2 \rangle, \quad J = - \kappa \frac{dT}{dx}, \quad - \frac{dH}{dx} = \frac{4\pi}{c} \sigma E, \quad \frac{dE}{dx} = \frac{i\omega}{c} H$$

формулируются условия на фронте, из которых получаются соотношения для области существования разряда и скорости его движения по отношению к холодному газу, втекающему в область разряда по нормали к фронту: здесь c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, κ — теплопроводность, ρ_0 — плотность холодного газа, $\langle \rangle$ — усреднение по времени, u — нормальная скорость газа. Как следует из работы, эта скорость определяется температуропроводностью газа при конечной температуре.

Как и фронт пламени в горелках, фронт разряда наклонен по отношению к направлению набегающего потока. На основании предложенной модели были проведены численные оценки для разрядов в воздухе и аргоне. Частота 15 мГц и другие параметры были приняты для существующего плазмотрона ИПМ АН СССР. Эти оценки дали значения температуры разряда 9000—10 000° К, что согласуется с экспериментальным значением 9800° К, полученным в работе Ю. А. Буевича и др. [26].

В работе Миронера и Хашфара [27] рассмотрены некоторые вопросы выделения высокочастотной энергии в потоке плотной движущейся плазмы.

В теоретической части разобран случай одномерного течения ионизированного газа в камере постоянного сечения при атмосферном давлении. Предполагается, что за зоной индукционного выделения энергии поток становится сверхзвуковым. Исследуется влияние тепловыделения на гидродинамические параметры течения.

Далее обсуждается влияние частоты на распределение энергии в потоке плазмы для безэлектродного высокочастотного разряда. Анализ приведен на основе аналогии нагрева газа с хорошо изученным нагревом твердого проводника в электромагнитном поле соленоида.

Теоретическая часть работы носит приближенный идеализированный характер без попытки детального описания состояния потока в разряде.

Работа Фримана и Чейза [28] посвящена механизму передачи энергии и рабочим характеристикам термического высокочастотного плазменного генератора. В ней независимо рассматриваются физические процессы в разряде и электрические характеристики источника мощности, причем последние берутся из опыта. В теоретической части записаны уравнения Максвелла и баланса энергии для плазмы в бесконечно длинном соленоиде без учета излучения при постоянном атмосферном давлении. Канал разряда моделируется двумя концентрическими зонами со скачком электропроводности на границе зон. Центральная зона считается проводящей с постоянной проводимостью, внешняя наоборот. Для получения зависимостей, дающих возможность вычислить напряженность магнитного поля, потенциал теплового потока и эффективный радиус разряда, применяется принцип минимума производства энтропии, известный из термодинамики необратимых процессов. Скорость возрастания энтропии в разряде выражается через тепло, уводимое из разряда радиальной теплопроводностью при постоянном радиусе канала. Полученные аналитические зависимости дали возможность численным методом определить характеристические кривые: зависимости напряженности магнитного поля от мощности разряда в азоте и аргоне для ряда частот при фиксированном радиусе канала. Исследованы зависимости отрыва разряда от стенки и плотности теплового потока от мощности, выделяемой в аргоне, кислороде и азоте.

Во второй половине работы теоретические выводы использованы для экспериментального определения области устойчивого существования разряда и выявления оптимальной связи источника мощности с параметрами разряда.

Экспериментальное исследование Шермана и Мак Кая [29] показало, что при увеличении потока газа через разрядный канал минимальная напряженность электрического поля возрастает медленнее, чем по линейному закону.

Рассмотрев существующие методы измерения тока в высоковольтных высокочастотных цепях, Пенфолд и Уордер [30] предложили удобный способ измерения тока в колебательном контуре по падению напряжения на индуктивности.

Р. Е. Ровинский и др. [31] исследовали отрыв безэлектродного высокочастотного разряда от стенки в неподвижных Ag и Xe в диапазоне давлений $10^{-2} \div 760$ мм рт. ст. Было установлено наличие трех областей давления; низкого давления $p < 1$ мм рт. ст., переходной области $p \approx 1 \div 250$ мм рт. ст. и высокого давления $p > 250$ мм рт. ст., которым присуща своя специфика, зависящая от механизма формирования разряда. Для областей высокого давления авторы подтвердили вывод работы [15] о том, что основным механизмом, определяющим отрыв плазмы от стенок разрядной колбы, является теплопроводность.

В работе М. Я. Смелянского и др. [32] рассмотрен отрыв разряда от стенки в потоке с тангенциальной подачей газа в разрядный канал при атмосферном давлении. Показано, что радиус разряда уменьшается с ростом расхода газа и составляет $0,4 \div 0,8$ радиуса трубки. В этих условиях отрыв разряда определяется теплопроводностью и конвективным теплообменом.

Газ	p , атм	d , мм	N , квт	f , мГц	$T_e \cdot 10^{-3}$, °К	$n_e \cdot 10^{-16}$, см $^{-3}$	G , л/мин	
A ₂ + O ₂	1	25.4	3.08	4	18.9		2.8—12.3	[33]
A _r	1	25.4	2.55		8		45	[34]
A _r	1	25	9.5	3—10	13		30	[35]
		30			9.5	0.88	12	
A _r	1	22	2—3	26	9.6	0.96	4	[36]
		16			9.75	1.2	2.5	
A _r	1	30	5.9	15—25	11		51	[37]
A _r	10	30	0.6	10	9			[38]
A _r	1	15—45	5	0.3—33	10.5	2	30—160	[39]
A _r	1	60	24	2	9.75	1.25	49	[40]
A _r	1	30		5.8	10.5		40	[41]
A _r	1	50.8	6	4.5	9.5	4.5		[42]
A _r	1	72	7.2	11.5	9.3	0.82		[43]
X _e	1	72	9.21	11.5	7.86	1.9		[43]
A _r	1	23	6	5.1	9	1	20	[44]
A _r	1	60	5.9	17	8.2	0.16	6.7	[45]
Воздух	1	100	18	4	7.1	0.05	30	[46]
Воздух	1	60	27	17.5	9.8		113	[26]

Измерению температур оптическими методами в безэлектродном высокочастотном разряде посвящен ряд работ [26, 33—46]. Эти работы отличаются главным образом условиями эксперимента, поэтому для наглядности экспериментальные результаты представлены в таблице, которая охватывает основные работы советских и зарубежных исследователей, опубликованных с 1961 года. Из рассмотрения данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что для аргоновой плазмы при мощностях разряда $2 \div 24$ квт и в диапазоне частот $2 \div 26$ мГц температура изменяется в среднем в пределах $8000 \div 11\,000$ °К. Исключение составляет работа Т. Рида [33], в которой завышена температура, так как необоснованно применен метод Ларенца и для пирометрических измерений выбрана линия аргона 7635 Å, подверженная реабсорбции. Спектроскопические исследования воздушной плазмы описаны в работах [26, 46]. Расхождение температур в таблице можно объяснить различием уровня удельных мощностей в разряде и инструментальными ошибками в измерениях.

Тепловое воздействие струи высокочастотной плазмы на тело с плоской и цилиндрической поверхностями показало [34, 47, 48], что удельные тепловые потоки достигают порядка 1 квт / см 2 . Эти измерения проводились на точных водяных калориметрах, изготовленных из меди. Средняя скорость потока плазмы составляла $20—50$ м / сек [34, 47]. Получение плазмы в безэлектродном разряде основано на применении в качестве источника высокочастотной электрической энергии коротковолновых генераторов. От

правильного выбора схем и параметров колебательных контуров генератора и согласования работы последнего с разрядом зависит эффективность и качество получения плазмы [49-52].

Совершенство получения плазмы в безэлектродном высокочастотном разряде характеризуется коэффициентом полезного действия (отношение мощности разряда к мощности, потребляемой от сети). В работах [33, 51, 53-59] показано, что эта величина для современных установок имеет порядок 36 ÷ 60%, а в импульсных устройствах достигает 70 ÷ 80%.

Канал разрядной камеры в большинстве установок выполнен из кварцевого стекла и его термозащита обеспечивается водяным охлаждением или гидродинамическим отжатием разряда от стенок канала. В работе Миронера [60] описан способ термозащиты стенок, основанный на применении медной водоохлаждаемой трубы, имеющей по образующей цилиндра разрез, ориентированный нормально к индуцированному току. Разрез заделывается жаростойким диэлектриком. По аналогичному принципу выполнен разрядный канал в работе А. В. Донского и др. [61] цилиндрической формы, стенки которого набраны из медных водоохлаждаемых трубок с зазором, заполненным диэлектриком.

Еще Г. И. Бабат [11] предсказывал, что высокочастотный безэлектродный разряд найдет широкое применение в технологических процессах электрохимии. Сегодня высокочастотный безэлектродный плазматрон становится рабочим инструментом физика, химика и металлурга, нуждающихся в нагреве газов до высоких температур без загрязнения. Применение высокочастотной плазмы в потоке аргона, водорода и других газов для получения жароупорных окислов и выращивания кристаллов тугоплавких материалов типа сапфира и рубина стало реальностью [62-65].

В такого рода разрядах успешно протекает процесс сфероидизации частиц [35] из хрома, тантала, вольфрама, алюминия, окиси магния и некоторых сплавов урана. При этом полученные частицы отличаются стерильностью химического состава, правильностью геометрической формы (сферы) и возможностью менять их размеры в пределах 50 ÷ 700 микрон. Безэлектродный разряд находит применение в спектральном анализе [66], где анализируемое вещество пульверизацией вводится в плазменную струю в порошкообразном, газообразном или жидком исходном состоянии. Главной причиной в пользу такого применения служит отсутствие загрязнения и большой полезный объем плазмы. Несомненный интерес представляет разряд для создания высокоинтенсивных импульсных источников света [57]. В спектроскопии безэлектродный разряд используется в качестве источника света для комбинационного рассеяния [67] и источника излучения вакуумного ультрафиолета [68].

Отсутствие загрязнений и другие потенциальные преимущества безэлектродного высокочастотного разряда при нагреве газа создают предпосылки для использования этого метода в аэродинамических установках [69-70]. Чан [69] описал нагрев высокочастотным полем сверхзвукового ($M = 3.5$) воздушного потока при статическом давлении 0.4 мм рт. ст. и температуре 900° С. Разрядное устройство состояло из стеклянного сопла Лавалы, переходящего в цилиндрический канал, вокруг которого был расположен индуктор и магнитная катушка, создающая продольное поле 1000 гаусс, которое используется для уменьшения амбиполярной диффузии электронов к стенкам трубки.

Аэродинамическая установка, описанная Карсуэллом [70], с высокочастотным подогревом газа, создающая сверхзвуковой поток плазмы низкой плотности состоит из баллонов со сжатыми газами, форкамеры, сверхзвукового сопла, испытательного участка, бустерного резервуара и системы вакуумных насосов. Нагрев газа осуществляется безэлектродным высокочастотным разрядом с емкостной связью на сверхзвуковом участке сопла. В установке применялись различные сопла из кварца диаметром среза около 20 мм при числах Маха $M = 2$. Статическое давление в сверхзвуковом потоке менялось в пределах 0.1 ÷ 10 мм рт. ст.

Электронная температура на срезе сопла достигала 65 000° К, тогда как температура газа составляла 750° К, что совпадает с результатами работы [71], в которой проведено измерение электронной температуры в плазме высокочастотного разряда при низких давлениях. Зондовыми измерениями были получены радиальные распределения электронов (максимальное значение $n_e = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) на срезе сверхзвукового сопла, что при данных условиях соответствует степени ионизации 0.04%. Мощность разряда составляла 1 квт при частоте осциллирующего поля 13.56 мГц.

Хотя большинство экспериментов выполнено на аргоне, были также проведены некоторые эксперименты на воздухе и азоте, которые представляют собой непосредственный интерес для аэродинамики. На этой установке были проведены исследования по взаимодействию электромагнитных волн сантиметрового диапазона (10 ÷ 25 ГГц) со сверхзвуковым потоком плазмы при различных углах падения радиоволн. Ряд исследований был посвящен процессам рекомбинации в потоке при введении туда присадок. Автор работы [70] Карсуэлл отмечает, что принцип, использованный в этой установке, может быть применен и в значительно более крупных системах.

Взаимодействие безэлектродного разряда с термической плазмой, полученной в дуговом плазматроне постоянного тока, Вермелен, Бодди, Вьерам [72] рассмотрели

с двух точек зрения: как средство повышения удельного импульса электротермического движителя и как средство управления распределением параметров потока.

Первая задача состоит в том, что в дуговом плазмотроне постоянного тока на оптимальных режимах можно получить стабильный и минимально загрязненный плазменный поток, который, расширяясь в сопле, затем нагревается безэлектродным высокочастотным разрядом, что приводит к повышению удельного импульса системы. Известно, что при оценке качества экспериментальных аэродинамических плазменных установок, важнейшим критерием служит равномерное распределение параметров потока. Это в первую очередь относится к получению потока с плоским профилем радиального распределения температуры. Такое регулирование было осуществлено в работе за счет скин-эффекта путем подвода мощности высокочастотным методом к предварительно полученной плазме. Было показано, что имеется возможность не только регулирования температурных профилей потока, но и некоторого их повышения.

Плазменные потоки, полученные в установках безэлектродного высокочастотного нагрева: использовались Ю. А. Буевичем, М. И. Якушиным [73-74] для исследования взаимодействия высоких температур и тепловых потоков с термопластами.

Поступила 31 I 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. H i t t o r f W. Ueber die Electricitätsleitung der Gase. Ann. Physik Chem., 1884, Bd. 21, H. 1, s. 90—139.
2. L e h r m a n n O. Ueber das Entladungspotentialgefälle. Ann. Physik Chem., 1892, Bd. 47, H. 11, s. 426—439.
3. T h o m s o n J. J. Radiation produced by the passage of electricity through gases. Philos. Mag., 1926, vol. 2, No. 9, p. 674.
4. T h o m s o n J. J. The electrodeless discharge through gases. Philos. Mag., 1927, vol. 4, No. 25, pp. 1128—1160.
5. T o w n s e n d I. S., D o n a l d s o n R. H. Electrodeless discharges. Philos. Mag., 1928, vol. 5, No. 27, pp. 178—191.
6. M a c K i n n o n K. A. On the origin of the electrodeless discharge. Philos. Mag., 1929, vol. 8, No. 52, pp. 605—617.
7. K n i p p C. T. Relative intensities of the magnetic and electrostatic illumination components in the electrodeless discharge. Phys. Rev., 1931, vol. 37, March, pp. 756—760.
8. S m i t h H., L y n c h W. A., H i l b e r y N. Electrodeless discharge in mercury Vapor. Phys. Rev., 1931, vol. 37, May, pp. 1091—1101.
9. B r a s e f i e l d C. J. High frequency discharges in mercury Helium and Neon. Phys. Rev., 1931, vol. 37, January, pp. 82—86.
10. M i e r d e l G. Untersuchungen über den elektrodenlosen Ringstrom. Ann. Phys., 1928, Bd. 85, H. 5, s. 612—640.
11. Б а б а т Г. И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы. Вести. электропромышленности, 1942, № 2—3.
12. B a b a t G. I. Electrodeless discharges and some allied problems. J. Inst. Elec. Engrs., 1947, vol. 94, pp. 27—37.
13. B i r k o h o f f G. Messung der elektrischen Vorgänge innerhalb einer Hochfrequenz—Ringentladung. Z. angew. Phys., 1958, Bd. 10, H. 5, s. 204.
14. S t r a u ß H. J. Untersuchungen über den Existenzbereich der elektrodenlosen Ringentladung. Ann. Phys., 1958, Bd. 1, H. 4—5 s. 281.
15. S a b a n e s F. Etude de la décharge électrique par induction dans les gaz rares. Ann. Phys., 1955, vol. 10, Novembre — Decembre, pp. 1026—1078.
16. R o m i g M. F. Steady state solutions of the radiofrequency discharge with flow. Phys. Fluids, 1960, vol. 3, No. 1, pp. 129—133.
17. E s k e r t H. U. Diffusion theory of the electrodeless ring discharge. J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, No. 9, pp. 2780—2788.
18. E s k e r t H. U. Transition from free to ambipolar diffusion in an electrodeless discharge. Proc. 5th Internat. Conf. Ionizal. Phenomena Gases, Munich, 1961, vol. 1, Amsterdam, 1962, pp. 537—544.
19. С о ш н и к о в В. Н., Т р е х о в Е. С. К теории высокочастотного вихревого разряда высокого давления. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 2.
20. С о ш н и к о в В. Н., Т р е х о в Е. С. К теории высокочастотного вихревого разряда высокого давления, II. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 3.
21. С о ш н и к о в В. Н., Т р е х о в Е. С. К теории вихревого разряда высокого давления в воздухе и аргоне, III. Теплофизика высоких температур, 1967, т. 5, № 3.
22. Г р у з д е в В. А., Р о в и н с к и й Р. Е., С о б о л е в А. П. Приближенное решение задачи о стационарном индуцированном высокочастотном разряде в замкнутом объеме. ПМТФ, 1967, № 1.

23. Ровинский Р. Е., Соболев А. П. Оптимальный частотный диапазон стационарного индуцированного разряда. Теплофизика высоких температур, 1968, т. 6, № 2.
24. Floyd J. J., Lewis J. C., Bayliss R. K. Radio-frequency — induced gas plasma at 250—300 kc/s. Nature, 1966, vol. 211, No. 5051.
25. Райзер Ю. П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа, как процесс медленного горения. ПМТФ, 1968, № 3.
26. Буевич Ю. А., Николаев В. М., Пластинин Ю. А., Сипачев Г. Ф., Якушин М. И. Оптические свойства плазмы безэлектродного разряда в воздушном потоке. ПМТФ, 1968, № 6.
27. Mirone A., Hushfar F. Radio frequency heating of a dense moving plasma. A. I. A. A., Electric propulsion Conference. Colorado Springs. March, 1963, 11—13.
28. Freeman M. P., Chase J. D. Energy — transfer mechanism and typical operating characteristics for the thermal r-f plasma generator. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 1.
29. Sherman C., Mc Sov I. F. Minimum Sustaining field strength for radio-frequency plasmas. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 6.
30. Penfold A. S., Warder R. C.; Jr. Current measurements in highvoltage radio frequency plasma discharges. Rev. Scient. Instrum., 1967, vol. 38, No. 10.
31. Ровинский Р. Е., Белоусова Л. Е., Груздев В. А. Геометрия безэлектродного разряда индуцируемого в инертных газах. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 3.
32. Смелянский М. Я., Кононов С. В., Якушин М. И. О некоторых особенностях отрыва потока ионизированного газа от стенок разрядной камеры в установке высокочастотного безэлектродного разряда. Электротермия, 1967, № 61.
33. Reed T. V. Induction — coupled plasma torch. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 5.
34. Reed T. V. Heat — transfer intensity from induction plasma flames and oxyhydrogen flames. J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, No. 8.
35. Монро А. Дж. Перспективные применения высокочастотного нагрева газа, ч. II. Сравнение дугового и высокочастотного методов нагрева. В сб.: «Исследования при высоких температурах», М., «Наука», 1967.
36. Гольдфарб В. М., Дресвин С. В. Оптическое исследование распределения температуры и электронной концентрации в аргоновой плазме. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, № 3.
37. Вурзель Ф. Б., Долгополов Н. Н., Максимов А. И., Полак Л. С., Фридман В. И. Высокочастотный безэлектродный плазматрон при атмосферном давлении. Тр. 20 междунар. конгр. по теор. и прикл. химии, М., 1965.
38. Митин Р. В., Прядкин К. К. Безэлектродный разряд высокого давления. Ж. техн. физ., 1965, т. 35, вып. 7.
39. Дымшиц Б. М., Корецкий Я. П. Экспериментальное исследование индукционного разряда. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, вып. 9.
40. Аладьев И. Т., Кулаков И. Г., Магдасиев О. Л., Шатилов А. П. Исследование стабилизированного кольцевого разряда в аргоне. Изв. СО АН СССР, серия техническая, 1966, вып. 3, № 10.
41. Molinet M. F. Etude de la repartition de la temperature electronique a l'interieur d'un plasma d'argon produit par un generateur H. F. C. R. Acad. Sci., Ser. B, 1966, t. 262, No. 21, pp. 1377—1380.
42. Johnston P. D. Temperature and electron density measurements in an r-f discharge in argon. Phys. Letters, 1967, vol. 20, No. 5.
43. Ровинский Р. Е., Груздев В. А., Гутенмахер Т. М., Соболев А. П. Определение температуры в стационарном высокочастотном индукционном разряде. Теплофизика высоких температур, 1967, т. 5, № 4.
44. Hughes D. W., Wooding E. R. The temperature distribution in an H — mode r-f. plasma torch. Phys. Letters, 1967, vol. 24A, No. 1.
45. Смелянский М. Я., Кононов С. В., Якушин М. И. Некоторые энергетические характеристики высокочастотного безэлектродного разряда в аргоне и воздухе. Электротермия, 1967, № 58.
46. Eckert H. U., Kelly F. L., Olsen H. N. Spectroscopic observations on induction — coupled plasma flames in air and argon. J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, No. 3.
47. Гольдфарб В. М., Донской А. В., Дресвин С. В., Клубник В. С. Исследование плазменного факела высокочастотной горелки. Теплофизика высоких температур, 1967, т. 5, № 4.
48. Кононов С. В., Якушин М. И. К определению интенсивности удельных тепловых потоков к поверхности в струях высокочастотного безэлектродного плазматрона на воздухе. ПМТФ, 1966, № 6.

49. Володин В. В., Донской А. В. Параметры колебательной системы коротковолнового генератора для питания высокочастотной плазмы. В сб.: «Промышленное применение потоков высокой частоты», М.—Л., «Машиностроение», 1964.
50. Кононов С. В. Особенности схем питания установок высокочастотного безэлектродного разряда. Докл. Моск. энерг. ин-та, Электротермические установки, М., МЭИ, 1967.
51. Трехов Е. С., Фоменко А. Ф. Влияние параметров безэлектродного плазмотрона на режим работы высокочастотного генератора. В сб.: «Физика газоразрядной плазмы», М., Атомиздат, 1968, вып. 1.
52. Гойхман В. Х., Цукерник З. С. Получение и исследование высокочастотной плазмы. Уч. зап. Ленинград. пед. ин-та, 1968, т. 384, вып. 2.
53. Мариновский С. В. Высокочастотное получение термической плазмы, ч. I. Экспериментальные рабочие характеристики высокочастотных плазменных горелок. В сб.: «Исследования при высоких температурах», М., «Наука», 1967.
54. Аладьев И. Т., Кулаков И. Г., Магдасиев О. Л., Шатилов А. П. Исследование безэлектродного кольцевого разряда в аргоне и в воздухе. В сб.: «Низкотемпературная плазма», М., «Мир», 1967.
55. Смелянский М. Я., Кононов С. В., Якушин М. И. Экспериментальное определение теплового и электрического баланса установки высокочастотного безэлектродного разряда, работающей в замкнутом цикле на аргоне. Докл. Моск. энерг. ин-та, Электротермические установки, М., МЭИ, 1967.
56. Reed T. B., Roddy J. T. Optical pyrometer measurement of r-f power. Rev. Scient. instrum., 1965, vol. 36, No. 5.
57. Андреев С. Н., Ванюков М. П., Егоров А. А., Соколов Б. М. Исследование эффективности выделения энергии в плазме безэлектродного высокочастотного разряда. Ж. техн. физ., 1967, т. 37, вып. 7.
58. Ровинский Р. Е., Груздев В. А., Широкова И. П. Об энергетическом балансе стационарного индуцированного разряда. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 1.
59. Scholz P., Brodwin M., Anderson T. Coupling Efficiency of the radio frequency plasma torch. AIAA Journal, 1967, vol. 5, No. 5.
60. Mirone A. Design of a high enthalpy, radio frequency, gas discharge volume. AIAA Journal, 1963, vol. 1, No. 11.
61. Донской А. В., Дресвин С. В., Гольдфарб В. М. Высокочастотные плазменные устройства. Изв. СО АН СССР, сер. техн. 1966, вып. 3, № 10.
62. Reboix I. Les courants d'induction haute frequence et leurs utilisations dans le domaine des tres hautes temperatures. Ingenieurs et Techniciens, 1964, No. 177.
63. Reed T. B. Growth of refractory crystals using the induction plasma torch. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 12.
64. Донской А. В., Дресвин С. В., Воронин К. К., Волынец Ф. К. Некоторые особенности процессов выращивания тугоплавких кристаллов в высокочастотных плазменных горелках. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, № 4.
65. Кулагин И. Д., Любимов В. К., Марин К. Г., Сахаров Б. А., Сорокин Л. М. Плазменный процесс получения монооксида кремния. Физика и химия обработки материалов, 1967, № 2.
66. Егорова К. А., Перевертун А. И. Некоторые экспериментальные исследования высокочастотного безэлектродного разряда в аргоне при атмосферном давлении. Изв. СО АН СССР, сер. хим. н., 1967, № 9, вып. 4.
67. Powell F., Fletcher O., Lippincott E. High intensity electrodeless sources for raman spectroscopy. Rev. Scient. Instrum., 1963, vol. 34, No. 1.
68. Plato M. Eine elektrodenlose Ringentladung als Strahlungsquelle für das Vakuum-Ultraviolet. Z. Naturforsch., 1964, Bd. 19a, No. 11, s. 1324—1327.
69. Chuan R. L. Plasma heating of Supersonic airstream. Phys. Fluids, 1958, vol. 1, No. 5.
70. Carswell A. I. Radio-frequency excited plasma tunnel for laboratory studies of supersonic plasma flow fields. Rev. Scient. Instrum., 1963, vol. 34, No. 9.
71. Clarkson M. H., Field R. E. Jr., Keefer D. R. Electron temperatures in several r-f. — generated plasmas. AIAA Journal, 1966, vol. 4, No. 3.
72. Vermeulen P. J., Boddie W. L., Wierum F. A. State control of a flowing plasma by means of radio frequency electromagnetic fields. AIAA Journal, 1967, vol. 5, No. 5.
73. Буевич Ю. А., Якушин М. И. Некоторые особенности термического разрушения разлагающихся материалов. ПМТФ, 1968, № 1.
74. Буевич Ю. А., Егоров О. К., Якушин М. И. О механизме разрушения полупрозрачных полимеров лучистым тепловым потоком. ПМТФ, 1968, № 4.