

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**А.В. Токарев**

**КОРОННЫЙ РАЗРЯД  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**

Бишкек 2009

УДК 533.521

ББК 22.333

Т 51

Рецензенты:

докт. физ.-мат наук, профессор,  
академик НАН КР А.Ж. Жайнаков,  
докт. физ.-мат. наук, профессор В.М. Лелевкин,  
докт. физ.-мат. наук Г.С. Денисов

Рекомендовано к изданию кафедрой физики  
и микроэлектроники и НТС КРСУ

**Токарев А.В.**

T51 **КОРОННЫЙ РАЗРЯД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ.** – Бишкек: КРСУ,  
2009. – 138 с.  
ISBN 978-9967-05-590-2

В монографии представлены результаты исследований физико-химических процессов в коронных разрядах при атмосферном давлении. Рассмотрены вопросы, связанные с характеристиками коронного разряда с высокотемпературной зоной ионизации и определена роль электрического ветра для теплообмена в коронном разряде. Показано, что коронный разряд может эффективно использоваться в технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Рассматриваются параметры коронных разрядов и их применение в области ионизации воздуха, для электроочистки газа и активации порошковых материалов.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и технологов, занимающихся вопросами физики и химии газоразрядной плазмы, электроочистки газа и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Может быть полезна в качестве учебного пособия преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов, специализирующихся по направлениям физика плазмы, физика газового разряда, теплофизика.

T 1604120000-09

ISBN ISBN 978-9967-05-590-2

УДК 533.521 (575.2) (04)

ББК 22.333

© КРСУ, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к коронным разрядам. Исследования коронного разряда ведутся в двух направлениях – физические исследования различных коронных разрядов и их применение для решения технологических задач.

Первым промышленным применением коронного разряда была установка для фильтрации паров серной кислоты, созданная Ф.Д. Котреллом [1, 2]. С тех пор фильтрация промышленных газов превратилась в самостоятельную отрасль промышленности. Тепловые электростанции, металлургические и химические предприятия, цементные заводы и многие другие предприятия оборудованы электрофильтрами. Развитие техники фильтрации газов было связано с необходимостью повышения степени очистки газов и уменьшения энергозатрат. Применение короны постоянного тока в электрофильтрах исчерпало возможности повышения эффективности процесса фильтрации. Возросшие требования по очистке производственных выбросов в окружающую среду заставляли искать новые пути повышения эффективности электрофильтров. В настоящее время основной тенденцией является применение импульсных коронных разрядов. Детальный обзор современного состояния техники электрофильтрации представлен в работе [3].

В последнее время появились новые направления. Например, в работе [4] коронный разряд применен для определения нарушений целостности металлического каната. Широко применяется коронный разряд в электрографии и электростатической печати [5, 6]. Применение короны для сушки различных материалов позволило получить новую технологию этих процессов [7, 8]. Перспективное направление применения коронного разряда в высоковольтных переключателях предлагается в работе [9].

Синтез озона в плазмохимических реакторах с использованием коронного разряда проводится в промышленных масштабах [10-14]. Озон, созданный в плазмохимических реакторах, широко применяется для обеззараживания воды и различных материалов. В этом отношении большое значение имеют работы по применению коронных разрядов на постоянном токе и импульсных коронных разрядов для озонирования и разложения органических материалов в воде и в других средах [15,16].

В работе [17] показана возможность эффективного синтеза сверхабсорбирующих сополимеров в импульсном коронном разряде. Импульсный коронный разряд был успешно применен в полупромышленной

установке для очистки от смол продуктов сжигания газа, полученного из биомассы [18]. Коронный разряд позволяет осуществлять эффективную полимеризацию органических масел [21].

В последнее время интенсивно развиваются технологии получения наноматериалов. В работах [19,20] исследуются эффективные способы получения углеродных нанотрубок в плазменном реакторе на коронном разряде при атмосферном давлении.

Коронный разряд применяется для возбуждения активной среды газовых лазеров [22]. В работе [23] показана возможность генерации активных атомов гелия в импульсном коронном разряде. Многообещающей областью применения коронных разрядов становится их использование для зажигания газовых смесей в двигателях внутреннего сгорания и в ракетных двигателях [24-26]. Областью применения коронных разрядов является обработка поверхностей полимерных материалов [27]. В работах [28,29] показана возможность эффективного осаждения биоаэрозолей с использованием коронного разряда. Практически все электрофильтры для очистки воздуха в помещениях работают на коронном разряде [30-36]. Во всех перечисленных приложениях, где используется импульсный коронный разряд, можно применить импульсно-периодический коронный разряд [37-43].

Развитию промышленных электрофильтров сопутствовало исследование коронных разрядов. Положительная и отрицательная корона на постоянном токе изучалась многими авторами как самостоятельное физическое явление. Известно, что в коронном разряде выделяются две области. В тонком светящемся слое у коронирующего электрода происходят процессы ионизации. В остальном объеме свечение отсутствует и в нем происходит перенос заряда к катоду ионами. Процессы ионизации и переноса заряда определяют вольтамперную характеристику и достаточно полно отражены в работах [44-52]. В коронном разряде наблюдается пульсирующий режим, который был впервые изучен в работе [53]. Исследованиями группы авторов было установлено, что при определенных условиях импульсный режим имеет место и в положительной, и в отрицательной короне [54-58]. Для определения параметров коронного разряда необходимо знать распределение напряженности электрического поля. Эта задача решается в аналитическом виде только для простейшей системы электродов острие-плоскость и аксиальной системы провод-цилиндр. Классификация многочисленных электродных систем, применяемых в промышленных установках по фильтрации газов, приведена в [48]. Задача расчета электрических полей в коронных разрядах

при различных конфигурациях электродов имеет большое значение для проектирования электрофильтров и ей посвящено много работ [59-66]. Распределение напряженности электрического поля между электродами необходимо для расчета вольтамперной характеристики разряда. В электрофильтре вольтамперная характеристика в значительной степени определяет параметры фильтра, поскольку она определяет количество носителей и условия зарядки частиц. Вычисления вольтамперных характеристик коронных разрядов для различных условий приводятся в работах [67-73]. Расчет вольтамперных характеристик электрофильтров должен учитывать пространственный объемный заряд, который создается не только ионами, но и заряженными частицами. Решением этой задачи занимались многие исследователи: Н.А. Капцов [46], И.П. Верещагин [48], В.И. Левитов, В.М. Решидов, Г.З. Мирзабекян [74], А.И. Месеяншин [75, 76] и другие авторы [77, 78]. На процессы переноса в электрофильтре оказывает большое влияние электрический ветер, который возникает в поле коронного разряда. Учету влияния электрического ветра посвящены работы [79-83]. Электрический ветер приводит к нарушению ламинарного потока в электрофильтре. Влияние электрического ветра на турбулизацию потока в фильтре рассматривается в работах [84-87].

Указанные работы относятся к коронным разрядам на постоянном токе. К определенному моменту возможности повышения эффективности электрофильтров на постоянном токе были исчерпаны. Выяснилось, что дальнейшее повышение степени очистки и уменьшение энергопотребления можно получить в электрофильтрах с импульсным питанием. Напряжение на электродах электрофильтра с импульсным питанием обычно представляет сумму постоянного напряжения ниже пробойного и накладываемого на него короткого импульса, превышающего пробойное напряжение. Повышение эффективности фильтрации связано с тем, что процессы зарядки частиц и их осаждение более эффективно происходят в электрических полях большой напряженности. Длительность импульса подбирается таким образом, чтобы разряд не переходил в искровой. В настоящее время диапазон импульсов, применяемых в электрофильтрации, простирается от миллисекунд до наносекунд. Одной из причин, обуславливающей столь большой диапазон длительностей, является большое разнообразие удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости частиц. Второй причиной является недостаточная изученность импульсных процессов в электростатических фильтрах [3].

Применение импульсных разрядов усложняет источник питания короны. К обычному источнику высокого напряжения добавляется источ-

ник импульсного напряжения. Значительное количество промышленных фильтров работает при напряжении 40-50 кВ постоянного напряжения. Генерация импульсов более высокого напряжения большой мощности представляет собой сложную задачу. Вопросы создания коротких импульсов высокого напряжения изложены в работах [88-90]. Разрабатываются новые способы генерирования высоковольтных импульсов с регулируемой частотой следования в положительном коронном разряде [37-39]. Предлагаемая схема возбуждения импульсно-периодического разряда исключает применение генератора высоковольтных импульсов, что значительно упрощает устройство электрофильтра.

В настоящее время основные исследования в области электроочистки газа направлены на системы, включающие в себя большие разрядные промежутки (до 0,5 м) и, как следствие, требующие повышенных напряжений питания как импульсных, так и постоянных.

Цель данной монографии заключается в обобщении результатов экспериментальных исследований теплофизических процессов, протекающих в поле коронного разряда, который реализуется в условиях, характерных для технологического применения в областях ионизации газа, дефектоскопии, активации химической активности порошковых материалов и электроочистки газа.

# 1. КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

## 1.1. Типы коронных разрядов

Коронный разряд – это слабосветящийся газовый разряд, который возникает при атмосферном или близком к нему давлении. Необходимым условием возникновения коронного разряда является значительная неоднородность электрического поля в разрядном промежутке, которая возникает из-за малого радиуса кривизны коронирующего электрода [44, 46, 47]. Это условие – большую неоднородность электрического поля – можно реализовать на различных системах электродов.

Наиболее исследованы две системы электродов. В одной из них роль электрода, создающего высокий градиент электрического поля,

выполняет острое, а вторым электродом является плоскость. Во второй системе аксиальной конструкции высокий градиент электрического поля создается у центрального электрода, который обычно выполняется из тонкой проволоки. Вторым электродом является проводящий цилиндр [44, 46–48].

Отличительной особенностью коронного разряда является то, что в коронном разряде всегда существуют две области (рис. 1.1). В первой, у электрода с малой кривизной поверхности и большим градиентом напряженности поля, происходят процессы ионизации. Эта область называется «активной», или «областью ионизации», или «чехлом» короны. Размеры этой области малы по отношению к величине разрядного промежутка

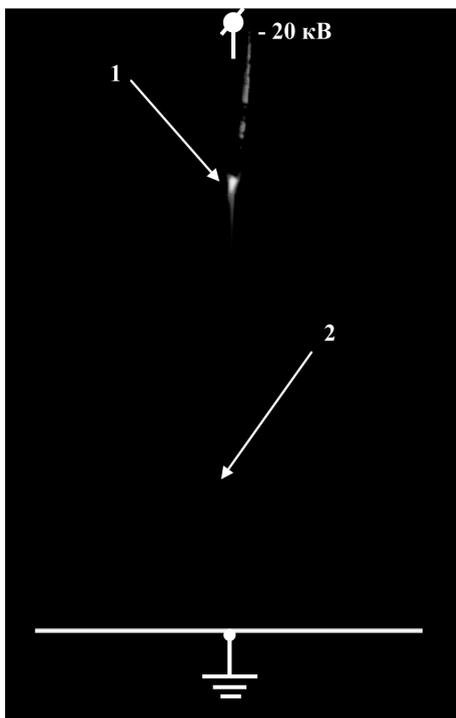


Рис. 1.1. Отрицательная корона в воздухе.  
1 – область ионизации, 2 – внешняя зона.  
 $U=20$  кВ,  $d=25$  мм.

и определялись в работах [91–93]. Во второй области процессы ионизации отсутствуют, и происходит перенос заряда. Эта область называется «внешней зоной». Ток разряда определяется собственным объемным зарядом, который создается в зоне ионизации и заполняет ее внешнюю зону. Во всех видах коронного разряда градиент потенциала у коронирующего электрода в широком диапазоне токов разряда сохраняется постоянным и мало отличается от градиента поля в начале разряда [44, 46–49]. Поскольку ток разряда определяется собственным объемным зарядом, основное значение при исследовании коронных разрядов приобретает изучение распределения электрического поля, распределение потенциала, распределение концентрации носителей заряда, распределение электронов и ионов по энергиям, а также процессы ионизации и рекомбинации.

В настоящее время предметом самостоятельных исследований являются несколько видов коронного разряда. В зависимости от знака напряжения, приложенного к коронирующему электроду, корона может быть положительной или отрицательной.

**Положительная корона.** В положительном коронном разряде высокое положительное напряжение прикладывается к электроду в виде проволоки малого диаметра или к острию, а цилиндр большого диаметра или пластина соединяются с землей [44–49]. При достижении напряжения зажигания свободные электроны, которые появляются в межэлектродном пространстве, ускоряются по направлению к электроду, имеющему положительный потенциал. В области ионизации, которая находится очень близко к коронирующему электроду, при неупругих столкновениях электронов и молекул нейтрального газа создаются положительные ионы и электроны. В сухом воздухе преобладают ионы  $O_2^+$  и  $N_2^+$ . Вновь появившиеся свободные электроны опять ускоряются электрическим полем и порождают дальнейшую ионизацию. Этот процесс имеет лавинный характер. Вторичные электроны, поддерживающие разряд, создаются в газе фотоионизацией фотонами, излучаемыми при процессах рекомбинации в плазменной области. В качестве критерия зажигания положительной короны в монографии Ю.П. Райзера [47] принимается условие возникновения стримера, обобщенное на случай неоднородного поля:

$$\int_0^{x_1} (\alpha - a) dx \approx 18 - 20, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ионизации;  $a$  – коэффициент прилипания.

Ионизационная область проявляется как слабое голубое свечение. В отличие от ровного свечения отрицательной короны, в положительной наблюдаются стримеры [47, 49, 91, 96–100]. Они проявляются как светящиеся нити, разбегающиеся от острия.

Коронирующая плазма определяется как область, где преобладают электронно-соударительные реакции. В положительной короне коронирующая плазменная область совпадает с областью ионизации. Определение протяженности коронирующего слоя исследовалось в работах [91, 92, 101].

Если напряженность поля у коронирующего электрода превысит определенную величину  $E_k$ , то возникнет самостоятельный коронный разряд. Начальное напряжение зажигания короны  $V_k$  связано с требуемым значением напряженности электрического поля  $E_k$ . Впервые эмпирическую формулу для критического поля зажигания короны в воздухе между коаксиальными цилиндрами дал Ф.Пик [45]:

$$E_k = 31\delta(1 + 0,308/\sqrt{r\delta})\kappa B / \text{см}, \quad (1.2)$$

где  $\delta$  – отношение плотности воздуха к нормальной, соответствующей  $p=760$  тор,  $t=25^\circ\text{C}$ ;  $r$  – радиус внутреннего электрода, в см;  $E_k$  – в В/м.

Начальная напряженность поля может быть определена расчетным путем из условия самостоятельности разряда, записываемого в виде:

$$\int_{s_0}^{s_k} \alpha_{\text{эф}} ds = K_1, \quad (1.3)$$

где  $K_1$  – постоянная, характеризующая процессы вторичной ионизации;  $\alpha_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент ионизации [47-49]. Зависимость эффективного коэффициента ионизации от напряженности поля для воздуха аппроксимируется выражением:

$$\alpha_{\text{эф}} = a\delta(E/\delta - c)^2, \quad (1.4)$$

где  $a$  и  $c$  – постоянные коэффициенты.

В работе [91] было получено выражение для разрядного напряжения воздушных промежутков с равномерным полем и из сопоставления с экспериментальными значениями разрядных напряжений определены значения коэффициентов  $c = 24,5 \times 10^5$  В/м,  $\sqrt{K_1/a} = 6,5 \cdot 10^4$  В/м<sup>1/2</sup> [48].

В монографии Райзера Ю.П. [47] приводятся выражения для напряженности электрического поля для некоторых случаев. Между концентрическими сферами радиусов  $r$  и  $R$  напряженность поля:

$$E = VrR/x^2(R-r), \quad E_{\max} \approx V/r \quad (\text{при } R \gg r). \quad (1.5)$$

Между шариком и удаленной плоскостью ( $R/r \rightarrow \infty$ )  $E \approx Vr/x^2$ .

Между острием параболоидной формы с радиусом закругления  $r$  и перпендикулярной плоскостью на расстоянии  $d$ , на расстоянии  $x$  от конца острия вдоль продолжения его оси:

$$E = \frac{2V}{(r+2x)\ln(2d/r+1)}, \quad E_{\max} \approx \frac{2V}{r\ln(2d/r)}. \quad (1.6)$$

Максимальное поле у параллельных проводов, разделенных расстоянием  $b$ , на расстоянии  $d$  от земли равно:

$$E_{\max} = \frac{V}{r \ln \left[ b/r \sqrt{1 + (b/2d)^2} \right]}. \quad (1.7)$$

Для одиночного провода над плоскостью ( $b \rightarrow \infty$ ) и просто двух проводов ( $d \rightarrow \infty$ ) соответственно имеем:

$$E_{\max} = V/r \ln(2d/r), \quad E_{\max} = V/r \ln(b/r). \quad (1.8)$$

Расчету электрических полей для электродов различных конфигураций посвящены специальные работы авторов [60, 61, 63, 64, 65, 102].

Свободные электроны могут также присоединяться к молекулам электроотрицательного газа (например,  $O_2$ ), образуя отрицательный ион или рекомбинируя с положительным ионом. Поскольку коэффициенты рекомбинации малы и плотность заряда относительно низка, рекомбинация обычно пренебрежимо мала [50]. В результате ионизация конкурирует главным образом с присоединением электронов. Вблизи электрода с высоким положительным потенциалом ионизация преобладает над присоединением вновь создаваемых электронов. На расстоянии нескольких радиусов проволоки, за внешней границей коронирующей плазмы, уровень ионизации равен уровню присоединения электронов. Все вновь созданные электроны присоединяются к молекулам, создавая отрицательные ионы. Вне коронирующей плазменной области напряженность поля недостаточна для создания электронов. В этой области ионы, одинаковой полярности с разрядным электродом, движутся к заземленному электроду. Положительные ионы определяют весь ток вне активной ионизационной области.

Основным параметром коронного разряда является вольтамперная характеристика разряда (ВАХ). Усредненная ВАХ коронного разряда с приемлемой для практики точностью аппроксимируется параболическим выражением [44, 46–48]:

$$I = kV(V - V_0), \quad (1.9)$$

где  $I$  – ток короны;  $V$  – напряжение между электродами;  $k$  – размерный коэффициент, который зависит от геометрии электродов и подвижности носителей заряда в дрейфовой области короны;  $V_0$  – начальное напряжение короны. Из этого выражения следует, что корона может существовать только при напряжениях, больших напряжениях зажигания, т.е. при  $V > V_0$ . Из выражения (1.9) следует, что здесь не рассматриваются токи субнаноамперного диапазона, которые предшествуют начальному напряжению короны. Уточнению расчета аналитического выражения для вольтамперной характеристики коронного разряда посвящено значительное количество работ, например [52, 66, 68, 69, 70–72, 91, 103].

Применение положительного коронного разряда для фильтрации газов исследовалось многими авторами [30, 35, 36, 46, 48, 74, 75, 95]. Положительный коронный разряд применяется для фильтрации несколько реже, чем отрицательный.

**Отрицательная корона.** Если коронирующий электрод соединен с отрицательным полюсом источника питания, то возникает отрицательный коронный разряд. Отрицательная корона с различными электродами и в различных газовых средах изучалась многими авторами [44–50, 54, 55].

Механизм создания ионов в отрицательной короне отличается от описанного для положительной короны [44–50]. Основным процессом, поддерживающим ток в катодном слое отрицательной короны, является лавинное размножение электронов. Вторичным процессом является эмиссия с катода и фотоионизация в объеме газа. [44–50, 51, 52, 54, 55, 67, 94, 91]. Процесс образования электронных лавин подобен процессу в положительной короне. В монографии Райзера Ю.П. [47] приводится следующий критерий зажигания отрицательной короны:

$$\int_0^{x_1} [\alpha(x) - a(x)] dx = \ln(1 + \gamma^{-1}), \quad (1.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ионизации;  $a$  – коэффициент прилипания электронов;  $\gamma$  – эффективный коэффициент вторичной эмиссии.

Вторичные электроны создаются за счет фотоэмиссии с поверхности электрода с высоким потенциалом.

Теоретически вторичные электроны в отрицательной короне могут быть получены фотоэмиссией из разрядного электрода бомбардировкой разрядной поверхности положительными ионами, или фотоионизацией газа [94]. Средняя кинетическая энергия ионов в коронирующей плазме

порядка 0,01-0,1 эВ. Энергии этих электронов недостаточно, чтобы выбить электрон из электрода. Фотоны, излучаемые в активной зоне коронного разряда, имеют достаточно энергии как для ионизации частиц газа, так и для извлечения электронов из электродной поверхности. Поскольку работа выхода (приблизительно 4 или 5 эВ) [95] для металлов намного меньше, чем энергия ионизации молекул кислорода и азота (12,06 эВ для  $O_2$  и 15,6 эВ для  $N_2$ ) [16], количество фотоэлектронов из поверхности электрода много больше, чем из газа. В результате наиболее существенным является механизм генерации вторичных электронов через фотоэмиссию из поверхности разрядных электродов [47, 54, 55, 91, 94]. Количество фотоэлектронов зависит от длины волны фотонов и от работы выхода материала разрядного электрода. Таким образом, подобно положительной короне вольтамперная характеристика отрицательной короны может зависеть от материала электрода и от состояния его поверхности.

В чехле короны создание новых электронов посредством электронно-соударительной ионизации преобладает над прилипанием электронов к  $O_2$ . Как и в положительной короне, скорость ионизации уравнивается скоростью электронного прилипания при уменьшении электрического поля на ионизационной границе [54, 55, 91]. Вне ионизационной границы прилипание преобладает над ионизацией, и число электронов постепенно уменьшается, как и уменьшается электрическое поле.

Вольтамперная характеристика отрицательной короны подобна характеристике положительной короны и с достаточной для практики точностью может быть представлена выражением (1.9). Начальное напряжение отрицательной короны в воздухе и в других газах отличается незначительно и может быть оценено с помощью уравнения Пика.

В настоящее время в экспериментальных и промышленных установках находят применение различные системы электродов – от простейших (коаксиальные цилиндры) до чрезвычайно сложных, представляющих собой сочетание многих электродов более простой формы. Наиболее полная классификация приведена в работе Верещагина И.П. [48]. Автор подразделяет все системы электродов по сложности структуры электрического поля на следующие:

- 1) системы с одномерным полем. К ним относится только одна система, используемая на практике, – коаксиальные цилиндры. В этом случае поле зависит только от одной координаты – текущего радиуса;
- 2) системы с плоскопараллельным полем и цилиндрическими коронирующими электродами (провод – плоскость, ряд проводов – плоскость и т.д.). Поле зависит от двух координат;

3) системы с плоскопараллельным полем и нецилиндрическими коронирующими электродами. Используются примерно такие же системы электродов, как и в предыдущем случае, однако в качестве коронирующих электродов используются не цилиндрические провода, а электроды более сложного профиля. В таких системах значение начальной напряженности меняется вдоль поверхности электрода;

4) системы с плоскомеридианным полем и цилиндрическими коронирующими электродами (провод внутри цилиндра ограниченной длины или тора, кольцо – плоскость и т.д.);

5) системы с плоскомеридианным полем и нецилиндрическими коронирующими электродами (игла – плоскость, игла внутри цилиндра и т.д.);

6) системы с трехмерным полем (ряды игл – плоскость, провод с иглами – плоскость и т.д.). Эти системы наиболее разнообразны, но вместе с тем представляют наибольшую трудность для расчета.

**Коронный разряд на переменном токе.** Особое место в исследованиях коронного разряда имеет корона переменного тока, возникающая на высоковольтных линиях электропередачи. Отличительными особенностями внешней зоны короны этого типа является наличие в ней области, в которой отсутствует объемный заряд. В короне переменного тока происходит изменение во времени и пространстве распределения и величины объемного заряда. В коронном разряде этого типа существенным является ток смещения. Потери электроэнергии при передаче на большие расстояния приводят к большим затратам. Для уменьшения коронного разряда необходимо увеличивать диаметр проводов, что приводит к большим расходам. Существует большое количество работ, посвященных исследованию возникновения коронного разряда в различных условиях, методов уменьшения потерь на корону и рекомендаций по проектированию линий с минимальными потерями [104, 105].

**Ультракорона.** На режим горения короны оказывают большое влияние многие факторы: кривизна электродов, состав и давление газовой смеси, разность потенциалов и некоторые другие. Обычно горение непрерывной положительной короны нестационарно. Горение короны сопровождается треском, при этом свет от короны пульсирует. Изменяя форму электродов, состав и давление газовой смеси и величину приложенного напряжения, можно добиться такого режима горения положительной короны, при котором чехол короны будет однородным, а в токе короны будет отсутствовать импульсная составляющая. Такой режим получил название **ультракороны** [67, 106].

В более поздних работах было установлено, что ток ультракороны пульсирует с высокой частотой, а свет ультракороны – синхронно с колебаниями тока [56, 57].

**Отрицательная корона на очень тонких проводах.** При уменьшении диаметра коронирующего провода в отрицательном коронном разряде происходит существенное изменение характера разряда. Основным механизмом воспроизводства электронов становится холодная эмиссия с поверхности коронирующего электрода. Эмиссия возникает в результате высокого градиента потенциала коронирующего электрода, обусловленного очень малым диаметром провода. Такой коронный разряд получил название отрицательной короны на очень тонких проводах [67].

**Биполярная корона постоянного тока.** Биполярная корона постоянного тока возникает в том случае, если оба электрода, на которые подается высокое напряжение, имеют малый радиус кривизны. Пример такой системы – два тонких провода. В зависимости от знака приложенного напряжения на этих электродах будут существовать разные коронные разряды. В случае биполярной короны имеются два коронирующих электрода, которые окружены зоной ионизации. Перенос заряда осуществляется ионами разных знаков, заряд которых взаимно компенсируется в центральной части разряда. Биполярная корона имеет большое значение при проектировании линий электропередач [104]. В значительной степени теория биполярной короны была разработана Попковым В.И. [62,107,108].

**Факельный разряд.** В.И. Попковым описан разряд, представляющий аномальную разновидность положительной короны. Разряд назван «факельным» по аналогии с факельным свечением разряда в высокочастотном контуре. Он имеет вид диффузного свечения, частично или полностью заполняющего разрядный промежуток, и существует при напряжениях на разрядном контуре  $\sim 150$  кВ. Факельный разряд, распространившийся до противолежащего электрода, представляется особым типом разряда в воздухе при атмосферном давлении. Он сравнительно мало изучен. Вместе с тем его исследование может представить не только чисто научный, но и определенный практический интерес. Факельный разряд, простирающийся до противолежащего электрода, может играть роль в тех процессах электронно-ионной технологии, где требуется большая плотность ионов в больших объемах газа, находящегося не при низком, а при высоком давлении. Необходимо отметить, что ток факельного разряда в 50 раз больше тока обычного коронного разряда при одинаковых условиях проведения эксперимента [109]. Сложность

и пространственная неоднородность физико-химических процессов в коронном факельном разряде не позволяют до настоящего времени дать достаточно полное описание этого разряда. Неясны характеры и последовательность процессов в разрядном промежутке, и их зависимость от параметров разрядного контура. Мало изучена динамика развития разряда и кинетика химических реакций, не ясны причины и степени влияния внешних условий на срыв устойчивости разряда, отсутствуют данные о роли неравновесных процессов в синтезе озона.

**Высокочастотная корона.** Если к системе коронирующих электродов приложить переменное напряжение частотой несколько килогерц, то возникает высокочастотная корона. Этот вид разряда существенно отличается от обычных коронных разрядов.

**Импульсные коронные разряды.** В последние десятилетия большое распространение получили импульсные коронные разряды. Эти разряды можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести разряды, возникающие при приложении кратковременных импульсов напряжения. Ко второй группе – разряды, которые представляют собой сумму двух разрядов – коронного разряда на постоянном токе и импульсного разряда. Наибольшее распространение импульсные коронные разряды получили в последние годы в установках по электроочистке газов [3].

## 1.2. Применение коронного разряда

В последнее время появились новые перспективные направления по применению коронных разрядов. Основной проблемой является контроль состояния тросов в различных производствах. Для определения нарушений целостности металлического троса в работе [4] применен коронный разряд. Использовано свойство короны зажигаться на неоднородности поверхности электрода. Коронный разряд возникает в том случае, если в тросе имеются поврежденные нити. Устройство позволяет вести контроль состояния троса в процессе работы и легко поддается автоматизации. Применение импульсного коронного разряда позволяет повысить эффективность локализации нарушений целостности троса.

Применение коронного разряда в электрографии и электростатической печати определяется свойствами короны. Эффективная зарядка частиц красителя осуществляется ионами, которые создаются в активной зоне короны. Перенос частиц красителя к барабану происходит под действием электрического поля коронного разряда. Специальным во-

просам по применению коронного разряда в электростатической печати посвящены работы [5, 6].

Новое направление в применении коронного разряда связано с тем, что в коронном разряде возникает электрический ветер. В результате возникают потоки, которые приводят к перемешиванию газа и интенсификации процессов теплообмена. Комплексное влияние этих процессов позволяет проводить эффективную сушку различных материалов, что позволило получить новую технологию этих процессов [7, 8].

Коммутаторы высоковольтных импульсов являются важным элементом импульсных систем. Различные типы устройств описаны в работах [88–90]. В работе [9] коронный разряд используется для высоковольтной коммутации нескольких каналов.

Плазмохимические реакторы с использованием коронного разряда применяются в промышленных масштабах [10–14]. Синтез озона в коронном разряде происходит с более высокой энергетической эффективностью. Весьма существенным является простота конструкции, так как не требуется вводить в разрядный промежуток диэлектрический барьер (стекло, керамика, эмаль и т.п.). Озонаторы коронного разряда позволяют использовать в качестве сырья атмосферный воздух, поскольку этот разряд обладает значительно меньшей чувствительностью к влажности и чистоте газа в отличие от барьерного разряда. Синтез озона в коронном разряде при энергозатратах того же порядка, что и в барьерном, происходит в резко неоднородном электрическом поле. Путем оптимизации разрядного контура удастся получать устойчивую корону при напряжении 15–25 кВ, способную синтезировать озон в концентрациях до 5 г/м<sup>3</sup> при энергозатратах 10–18 кВт×ч/кг [110, 111]. В настоящее время большой интерес проявляется также к генерации озона в наносекундном коронном разряде. На основе импульсного коронного разряда разработаны озонаторы с выходом озона 8–30 кВт×ч/ [112].

Озон, созданный в плазмохимических реакторах, широко используется для обеззараживания воды и различных материалов. Но при возбуждении импульсного коронного разряда кроме озона возникают свободные радикалы, которые активно участвуют в химических реакциях. В импульсном разряде возникает ударная волна, которая разрушает органические примеси. В этом отношении большое значение имеют работы по применению коронных разрядов на постоянном токе и импульсных коронных разрядов для озонирования и разложения органических материалов в воде и других средах [15, 16].

В работе [17] была показана возможность эффективного синтеза сверхабсорбирующих сополимеров в импульсном коронном разряде. Импульсный коронный разряд был успешно применен в полупромышленной установке для очистки от смол продуктов сжигания газа, полученного из биомассы [18]. В последнее время интенсивно развиваются технологии получения наноматериалов. В работах [19, 20] исследуются эффективные способы получения углеродных нанотрубок в плазменном реакторе на коронном разряде при атмосферном давлении. Коронный разряд позволяет осуществлять эффективную полимеризацию органических масел [21]. Он применяется для возбуждения активной среды газовых лазеров [22]. В работе [23] показана возможность генерации активных атомов гелия в импульсном коронном разряде. Многообещающей областью применения коронных разрядов становится их использование для зажигания газовых смесей в двигателях внутреннего сгорания и в ракетных двигателях [24–26]. Областью применения коронных разрядов является и обработка поверхностей полимерных материалов [27]. В работах [28, 29] показана возможность эффективного осаждения биоаэрозолей с использованием коронного разряда. Практически все электрофильтры для очистки воздуха в помещениях работают на коронном разряде [30–36]. Во всех перечисленных приложениях, где используется импульсный коронный разряд, можно применить импульсно-периодический коронный разряд, который был исследован в настоящей работе [37–43].

Во всех перечисленных работах важнейшим элементом является источник импульсного напряжения. Диапазон длительностей импульсов, применяемых в импульсных коронных разрядах, простирается от  $10^{-3}$  до  $10^{-9}$  сек. Требования к длительности импульса, частоте повторения, амплитуде импульса и скорости нарастания фронта для различных применений имеют существенные отличия.

Если обобщить большое количество схем питания импульсных коронных разрядов, приведенных в монографии [3], то можно определить импульсный коронный разряд как сумму двух разрядов, происходящих в одном разрядном промежутке. Это постоянный коронный разряд, который определяется постоянным напряжением на электродах, и импульсный разряд, который возникает при кратковременном подключении высоковольтного источника. В этом случае источник питания состоит из высоковольтного выпрямителя, который обеспечивает постоянный коронный разряд, и источника повышенного напряжения, который подключается на определенное время через высоковольтный коммутатор.

Параметры высоковольтного импульса будут определяться в основном свойствами коммутатора. В случае импульсного коронного разряда используется генератор высоковольтных импульсов. В настоящее время существуют системы газоочистки с миллисекундными и микросекундными импульсами. Проводятся исследования по применению наносекундных импульсов. Вопросы создания надежных высоковольтных импульсных систем весьма актуальны.

### 1.3. Характеристики коронного разряда

В коронном разряде плазма генерируется электронноударной ионизацией, когда электроны с высокими энергиями ионизируя нейтральные частицы приводят к рождению вторичных электронов и ионов. В то же время молекулы газа (в сухом воздухе преобладают молекулы кислорода и азота) захватывают электроны со средними значениями энергии, образуя отрицательные ионы. Таким образом, процессы ионизации приводят к увеличению числа электронов, тогда как прилипание уменьшает число электронов. Эффективное образование плазмы происходит при преобладании процессов ионизации над процессами прилипания [103].

Для реализации конкретного технологического процесса необходимо управлять энергетическими характеристиками коронного разряда. В большинстве случаев это сводится к практически единственному способу – изменению величины напряжения в разрядном контуре. В ряде случаев удается изменить тип коронного разряда путем организации импульсных систем питания [39, 113].

В литературе указывается, но численного подтверждения не приводится, что генерационная зона определяет как усредненные, так и динамические характеристики короны [56]. В таком случае, воздействуя только на генерационную зону, можно контролировать свойства всей короны. Активное воздействие на генерационную зону возможно производить сильным уменьшением плотности газа вблизи коронирующего электрода за счет его нагрева.

Исследование характеристик коронного разряда с высокотемпературной зоной ионизации проводились на разрядном узле коаксиальной конструкции со следующими параметрами: диаметр внешнего дюралюминиевого электрода  $2R=57$  мм, диаметр коронирующего платинового электрода  $2r=0,2$  мм. Для осуществления изменения температуры генерационной области через коронирующий электрод пропускается ток с отдельного сильноточного источника [114].

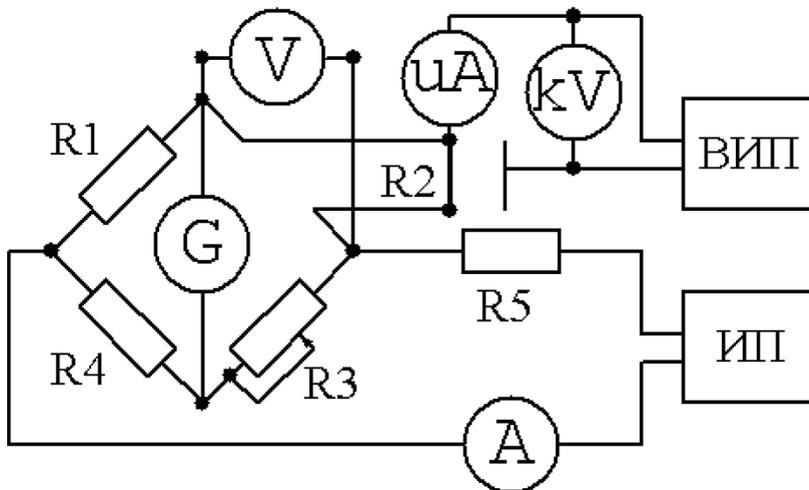


Рис. 1.2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки.

Известно, что при горении коронного разряда образуется электрический ветер, способствующий в данном случае охлаждению электрода. Изменение температуры необходимо компенсировать увеличением тока накала. Удобно производить выравнивание температуры путем фиксации отношения ЭДС, возникающего на концах электрода, к току накала. Для измерения электрического сопротивления электрода, фиксирования и восстановления первоначальной температуры используется мост Уитстона (рис. 1.2) на постоянном токе, в одно из плеч которого включена нить коронирующего электрода R2. Сопротивления плеч моста R3 и R4 в 100 раз больше сопротивлений R2 и R1 соответственно. Мост питается от источника питания ИП через сопротивление R5. Для точного измерения малых приращений тока накала служит амперметр. Поскольку  $R3 + R4 = 100 \cdot (R1 + R2)$ , то в плечах моста R3 и R4 протекает лишь 1% полного тока. Поэтому можно считать, что уменьшение тока накала равно величине тока в цепи сопротивления R5. Таким образом, малые изменения тока накала нити можно точно определять измерительным прибором с соответствующим пределом измерений.

Сопротивление R3 представляет собой магазин сопротивлений, необходимый для уравнивания плеч моста R3 и R4, регистрируемого гальванометром, с учетом изменения сопротивления R2 при нагреве коронирующего электрода. При подаче высокого напряжения на разрядную

ячейку, вследствие воздействия электрического ветра на генерационную зону, происходит охлаждение электрода. Для увеличения температуры необходимо увеличить ток накала до уравнивания плеч моста R1 и R2 с одновременным замером напряжения на концах нити.

Выдерживая постоянным сопротивление электрода можно говорить о постоянстве температуры генерационной зоны коронного разряда, восстанавливаемую из градуировочных таблиц платиновых термометров сопротивления [115].

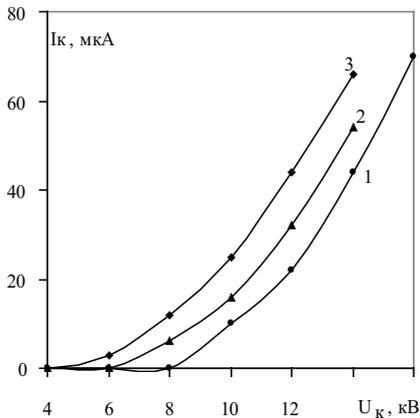


Рис. 1.3. Вольтамперные характеристики коронного разряда положительной полярности в зависимости от температуры нагрева коронирующего электрода: 1 – 30 К; 2 – 433 К; 3 – 668 К.

**Результаты.** Зависимости вольтамперных характеристик коронного разряда от степени нагрева нити для отрицательной и положительной полярности показаны на рис. 1.3, 1.4. Выбор температур обусловлен переводом сопротивлений, соответствующих гармоническому ряду значений тока накала. Меньшие значения тока для положительной короны, вероятно, обусловлены различными подвижностями носителей заряда – отрицательных ионов в отрицательной короне и ионов – в положительной. Для положительного коронного разряда (рис. 1.3) ограничение напряжения в 14 кВ обусловлено пробоем при больших напряжениях. Как видно из графиков, повышение температуры генерационной зоны разряда приводит к заметному росту тока короны при прочих равных параметрах. Увеличение тока короны можно объяснить уменьшением плотности газа в приэлектродной области, что приводит к увеличению

длины пробега электронов при данном напряжении короны. Следовательно, в среднем электроны приобретают бóльшую энергию, что приводит к увеличению процессов ионизации за счет уменьшения процессов прилипания и рекомбинации. Так, для отрицательной короны при нагреве зоны ионизации до 663 К происходит увеличение тока в 1,5–3,2 раза, для положительной – в 1,5–2,5 раза при 668 К.

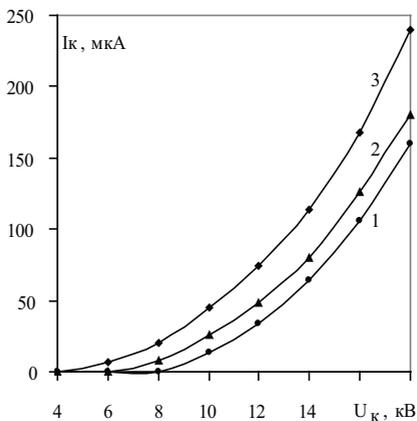


Рис. 1.4. Вольтамперные характеристики коронного разряда отрицательной полярности в зависимости от температуры нагрева коронирующего электрода: 1 – 30 К; 2 – 430 К; 3 – 663 К.

Нагрев генерационной зоны разряда также приводит к уменьшению напряжения зажигания короны. Для определения напряжения зажигания строится зависимость обратного сопротивления  $I_k/U_k$  от  $U_k$ , называемая редуцированной характеристикой (рис. 1.5, 1.6). Редуцированная характеристика короны имеет линейный характер, и точка пересечения с осью  $U_k$  равна напряжению зажигания разряда [47]. Из графиков видно, что напряжение зажигания для отрицательной короны понижается с 8,5 кВ до 5,3 кВ при 663 К, для положительной – с 8,3 кВ до 5,1 кВ при 668 К.

Опыт показывает, что в ряде газов, в частности в воздухе, напряжения зажигания положительной и отрицательной корон различаются мало. В нашем случае напряжение зажигания положительной короны по сравнению с отрицательной короной в среднем по всему диапазону температур выше на 2,3%.

Более позднее зажигание положительной короны можно объяснить особенностями зажигания разряда, когда для инициации горения в по-

ложительной короне необходимо присутствие свободных электронов в межэлектродном промежутке для преобладания процессов ионизации над процессами прилипания, в то время как для отрицательной короны за счет различных эмиссионных процессов с коронирующего катода наличие свободных электронов не критично.

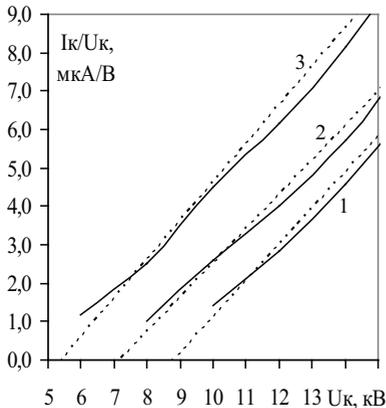


Рис. 1.5. Редуцированные характеристики коронного разряда отрицательной полярности в зависимости от температуры нагрева коронирующего электрода: 1 – 30 К; 2 – 430 К; 3 – 663 К.

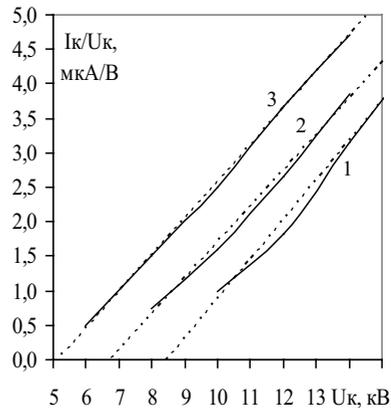


Рис. 1.6. Редуцированные характеристики коронного разряда положительной полярности в зависимости от температуры нагрева коронирующего электрода: 1 – 30 К; 2 – 433 К; 3 – 668 К.

Напряжение зажигания коронного разряда также, наряду с методом построения редуцированных характеристик, можно определить по эмпирической формуле Пика, для разрядного узла коаксиальной конструкции, имеющей вид:

$$U_{\text{заж}} = 31,0n\delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \cdot r \ln \frac{R}{r}, \quad (1.11)$$

где  $n$  – постоянная, объединяющая коэффициент шероховатости коронирующего провода и коэффициент, отражающий возможное смещение провода относительно центрального положения,  $\delta$  – отношение плотности воздуха к нормальной.

В случае принудительного нагрева генерационной зоны целесообразно использовать следующее выражение для  $\delta$ :

$$\delta = \frac{(1 + 0,00367 \cdot 25)b}{(1 + 0,00367 \cdot t)760}, \quad (1.12)$$

где  $b$  – давление в мм рт. ст.,  $t$  – температура в °С.

Необходимо отметить, что в физическом содержании формулы Пика речь идет о давлении и температуре среды, в которой находится разрядная ячейка.

С учетом (1.12) формула Пика может быть использована для расчета напряжения зажигания короны для различных температур коронирующего электрода, результаты которого, в сравнении с экспериментальными данными для отрицательной и положительной короны, представлены на рис. 1.6. Видно, что экспериментальные данные и расчет совпадают с точностью до 4,4%, что может служить основанием для внесения поправки в физическое содержание формулы Пика.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что формула Пика справедлива для условий воздействия только на генерационную зону коронного разряда. Следовательно, можно говорить о том, что давление и температура, фигурирующие в (1.11), относятся лишь к условиям, в которых находится генерационная зона, в независимости от того, в каких условиях находится внешняя зона разряда.

#### **1.4. Электрический ветер и теплообмен в коронном разряде**

Коронные разряды благодаря своим особенностям широко используются для плазмохимического синтеза озона из кислорода и бинарных смесей с азотом, очистки токсичных газовых выбросов от окислов азота и монооксида углерода, в электрофильтрах для очистки отходящих газов от взвешенных частиц [3, 110, 116, 117]. При разработке технологических устройств на основе коронного разряда необходимо на стадии проектирования уделять особое внимание условиям теплообмена в аппарате. Особенно это касается плазмохимических реакторов, так как перегрев разрядной зоны может приводить к термическому разложению продуктов реакции.

Учет мелкомасштабных газодинамических явлений (электрический ветер), сопровождающих коронный разряд при расчете теплообмена в реакторе, позволяет повысить эффективность его работы.

В известной литературе процессы теплообмена в устройствах на основе коронного разряда не рассматриваются. Поэтому изучение осо-

бенностей теплообмена в указанных устройствах представляет научный и практический интерес.

Исследование распределения входящей тепловой энергии между тепловым потоком через охлаждаемый катод, теплом, выносимым из реактора плазмообразующим газом, и энергией, расходуемой на образования продуктов плазмохимических реакций; определение коэффициентов теплоотдачи от плазмообразующего газа к стенке реактора для коронных разрядов различного типа, реализуемых в коаксиальной геометрии разрядного промежутка, является актуальной задачей.

Исследован плазмохимический реактор, схема которого приведена на рис. 1.7. В теплоизолирующем корпусе 1 располагается разрядный узел, состоящий из цилиндрического заземленного электрода 3 снабженного системой водяного охлаждения 2. По оси цилиндра располагается коронирующий провод из нихрома 4, диаметром 0,25 мм. Торцевые поверхности электрода 3 закрыты заглушками 5, через которые осуществляется вход – выход газа. На входе и выходе воды и газа установлены датчики температуры  $T_1$ – $T_4$  и расхода [118].

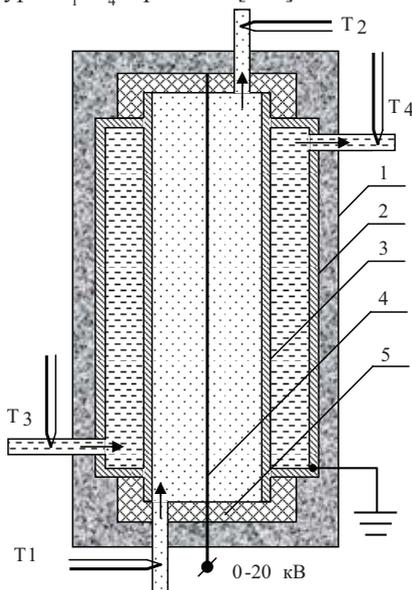


Рис. 1.7. Схема экспериментальной установки: 1 – теплоизолирующий корпус; 2 – система охлаждения водой; 3 – заземленный цилиндрический электрод; 4 – коронирующий электрод; 5 – торцевая заглушка;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  – входные и выходные датчики температуры газа и жидкости.

Для реализации в разрядном узле положительной или отрицательной короны на коронирующий провод подается высокое напряжение (до 20 кВ.) соответствующей полярности. Импульсно-периодический коронный разряд реализовывался по технологии, рассмотренной в работе [39]. В электрической схеме источника питания цилиндрический катод соединяется с заземляющим проводом через тиратрон. Частота включения тиратрона задается внешним генератором. Для предотвращения срыва коронного разряда в дуговой разряд в разрядную цепь со стороны анода вводится индуктивность величиной 2600 Гн [42].

Ток в цепи разряда измеряется многопредельным микроамперметром (мА), а напряжение на разрядном контуре – с помощью киловольтметра (кВ). Шунты и делители напряжения позволяют определять временные и амплитудные характеристики импульсов тока и напряжения разряда. В качестве плазмообразующего газа использовался атмосферный воздух. Регистрация озона на выходе реактора производилась озонометром «Медозон 254/3».

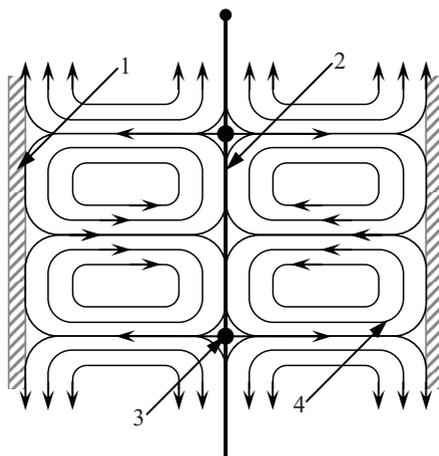


Рис. 1.8. Схема движения газа под действием электрического ветра:

- 1 – цилиндрический электрод; 2 – коронирующий электрод;
- 3 – коронирующая точка; 4 – траектории движения молекул газа.

**Электрический ветер.** При горении коронных разрядов любого типа возникают газодинамические явления в форме электрического ветра (ЭВ) [48]. ЭВ представляет собой коллективное движение газа в разрядном промежутке, возникающее в результате столкновений заряженных молекул, движущихся по направлению силовых линий поля с

нейтральной компонентой газовой среды. В результате трения газовых потоков движение становится вихревым и сложным рис. 1.8, на место уходящих масс газа поступают новые, возникает циркуляция газа от коронирующих точек коронирующего электрода к цилиндрическому электроду и обратно в зоны, где нет коронирующих точек. Наличие ЭВ в разрядном промежутке может существенным образом изменить общую картину теплопередачи в разрядном промежутке за счет увеличения коэффициента теплоотдачи плазмообразующего газа стенке реактора.

Скорость электрического ветра  $W_э$  приблизительно обратно пропорциональна корню квадратному из величины расстояния до коронирующего электрода, достигает 0,5–1,0 м/сек и может быть подсчитана по приближенной формуле Ланденбурга, справедливой для воздуха при обычной температуре (м/сек):

$$W_э = 5,34 \cdot 10^{-7} \frac{E}{\sqrt{H}}, \quad (1.13)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, В/м (принята равномерной в пространстве между электродами);  $H$  – расстояние между коронирующим и цилиндрическим электродами, м.

В экспериментах использовался цилиндрический электрод с внутренним радиусом 28,75 мм. При напряжении питания разряда 18 кВ средняя напряженность электрического поля в разрядном промежутке составляет величину 626 кВ/м. Скорость электрического ветра, оцененная по эмпирической формуле (1.13), достигает величины 2 м/сек. Данное значение скорости ветра является оценочным и может изменяться в зависимости от условий проведения опытов.

**Теплопередача в реакторе.** Показанное на рис. 1.9 температурное поле в системе газ – стенка – вода соответствует установившемуся режиму процессов теплопереноса в коаксиальном разрядном узле с внутренним и внешним диаметрами  $d_1=57,5$  мм;  $d_2=61,5$  мм. Температурное поле не меняется с длиной трубы и является функцией радиуса  $r$ . Тепловая энергия, выделяющаяся в зоне разряда 3, повышает температуру газа, и тепло через цилиндрическую стенку 2 из дюралюминия передается охлаждающей воде 1. Перепады температур  $\Delta t_э = t_{э2} - t_{э1}$ ; и  $\Delta t_{жс} = t_{жс2} - t_{жс1}$  измерялись термопарами. Эффективность теплообмена определяется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  цилиндрической стенки, коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_э$  от газового потока к стенке и коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{жс}$  от жидкости к стенке.

После проведения необходимых измерений для сведения энергетического баланса вычислялось, по каким каналам происходил вынос из реактора вводимой электрической мощности.

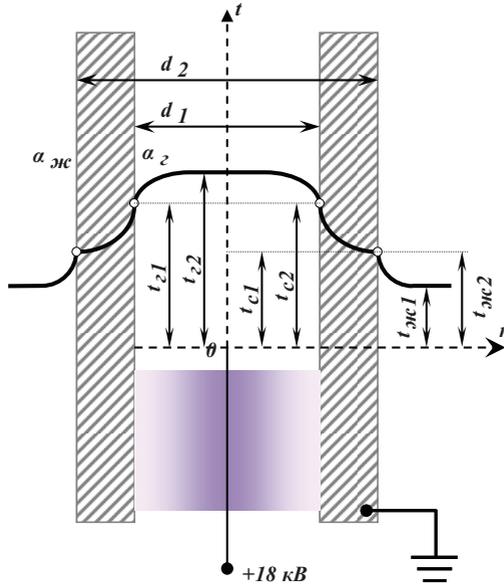


Рис. 1.9. Теплопередача через однородную цилиндрическую стенку.

$Q_1$  – тепловая мощность, отдаваемая в воду, охлаждающую реактор:

$$Q_1 = G_{жс} c_{pжс} \Delta t_{жс}, \quad (1.14)$$

$G_{жс}$  – расход воды,  $кг/с$ ;  $c_{pжс}$  – теплоемкость воды,  $кДж/кг \cdot K$ ;  $\Delta t_{жс}$  – разность температур воды на входе и выходе из реактора,  $^{\circ}C$ .

$Q_2$  – тепловая мощность, выносимая из реактора прокачиваемым воздухом:

$$Q_2 = G_{в} \rho_{в} c_{pв} \Delta t_{в}, \quad (1.15)$$

$G_{в}$  – объемный расход воздуха,  $м^3/с$ ;  $\rho_{в}$  – плотность воздуха,  $кг/м^3$ ,  $c_{pв}$  – теплоемкость воздуха,  $кДж/кг \cdot K$ ;  $\Delta t_{в}$  – разность температур воздуха на входе и выходе из реактора,  $^{\circ}C$ .

$Q_3$  – тепловая мощность, расходуемая на синтез озона:

$$Q_3 = r G_{\theta} C, \quad (1.16)$$

$r$  – теплота образования озона, равная  $3 МДж/кг$ ,  $м^3/с$ ;  $C$  – концентрация озона на выходе из реактора,  $кг/м^3$ .

$Q_4$  – потери тепловой мощности в окружающую среду:

$$Q_4 = \lambda(0,5\Delta t_{жс} - t_{oc}) \cdot \left( \frac{2\pi l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{F}{\delta} \right), \quad (1.17)$$

которые складываются из потерь через теплоизоляцию цилиндрической формы, – это первый член слагаемого в формуле (1.17), и потерь через плоские торцевые теплоизолирующие стенки – это второй член слагаемого в формуле (1.17).

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала цилиндра,  $Bm/mK$ ;  $l$  – длина теплоизолирующего цилиндра,  $m$ ;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды,  $K$ ;  $d_2$  – внешний диаметр теплоизолирующего слоя,  $m$ ;  $d_1$  – внутренний диаметр теплоизолирующего слоя,  $m$ ,  $F$  – суммарная площадь поверхности двух торцевых теплоизолирующих крышек,  $m^2$ ;  $\delta$  – толщина теплоизоляции на торцевых крышках,  $m$ .

Несмотря на малые тепловые потери в окружающую среду тепловой баланс между электрической мощностью, вводимой в реактор

$$N_{VA} = IU, \quad (1.18)$$

и различными энергетическими потоками, выходящими из реактора, свести не удавалось. Поэтому предполагается, что часть электрической мощности, которая не укладывается в тепловой баланс, расходуется на диссоциацию молекулярного азота и вычисляется по формуле:

$$Q_5 = N_{VA} - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \quad (1.19)$$

Известно, что при действии на молекулярный азот электрических разрядов [давление 130 – 270  $n/m^2$  (1 – 2  $mm\ pt\ cm$ )] или при разложении нитридов В, Ti, Mg и Ca, а также при электрических разрядах в воздухе может образоваться активный азот, представляющий собой смесь молекул и атомов азота, обладающих повышенным запасом энергии. Азот, подвергнутый действию разрядов, приобретает повышенную химическую активность и продолжает светиться при рекомбинации атомарного азота в молекулярный в течение десятков секунд [119]. Учитывая высокую энергию диссоциации молекулы азота ( $r_N = 51,428$   $MDж/кг$  [120]) и большое время жизни атомов, данная гипотеза находит косвенное подтверждение. Исходя из этого, можно вычислить ожидаемую наработку  $G_N$ ,  $кг/с$  атомарного азота на выходе из плазмохимического реактора.

$$G_N = Q_5 / r_N \quad (1.20)$$

Она составляла для импульсной, отрицательной и положительной корон соответственно 0,176; 0,213 и 0,162 мг/с.

При этом концентрация атомарного азота вычислялась по формуле

$$C_N = G_N / G_0 \quad (1.21)$$

Она составляла для импульсной, отрицательной и положительной корон соответственно 10,59; 12,77 и 9,7 з/м<sup>3</sup>.

Результаты расчета тепловых потоков по различным каналам приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип коронного разряда	$N_{\text{ва}}, \text{Вт}$	$Q_1, \text{Вт}$	$Q_2, \text{Вт}$	$Q_3, \text{Вт}$	$Q_4, \text{Вт}$	$Q_5, \text{Вт}$	$\alpha, \text{Вт/м}^2\text{-К}$	$Nu_{\text{ж}}$	$Re_{\text{ж}}$	$W_p, \text{м/сек}$
Импульсный	27,30	17,94	0,094	0,106	1,87	9,08	12290	134,7	48285	22,5
Отрицательный	27,54	14,60	0,094	0,038	1,87	10,94	92,66	101,6	33924	15,81
Положительный	20,00	10,20	0,084	0,014	1,38	8,32	68,50	75,2	23283	10,85

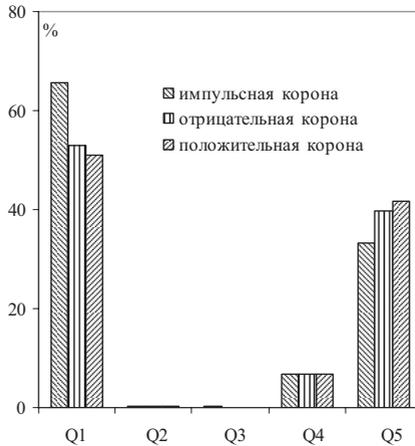


Рис. 1.10. Распределение потерь тепловой мощности по различным направлениям (в %) от вложенной электрической мощности.

На рис. 1.10 показано распределение энергетических потоков, выходящих из реактора, в % отношении к вводимой электрической мощности. Из рис. следует, что основными каналами вывода тепловой энергии

являются  $Q_1$  – тепловая мощность, отдаваемая в воду, охлаждающую реактор, и  $Q_5$  – энергия, расходуемая на диссоциацию молекулярного азота, которая рассеивается за пределами реактора. Остальные тепловые потери связаны с несовершенством теплоизоляции и скрыты в энергии эндотермических реакций образования озона.

Так как тепловая мощность  $Q_1$  поступает в воду, охлаждающую реактор, из воздуха, подвергающегося действию коронного разряда, то из закона Ньютона-Рихмана можно определить экспериментальный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_э = Q_1 / F\Delta t_{жс} \quad (1.22)$$

Данный коэффициент для всех трех исследуемых разновидностей коронного разряда оказался аномально большим (табл. 1.1) и требует своего объяснения.

Скорость продольного движения воздуха внутри реактора от места его входа к месту выхода составляла всего 0,65 см/с. Влияние такой маленькой скорости на теплообмен весьма незначительно. Если согласно формуле Ландербурга электрический ветер от коронного разряда в условиях эксперимента имеет скорость 2 м/с, то этой скорости также заведомо недостаточно для создания таких больших коэффициентов теплоотдачи. Вычислим ту скорость, которая при движении газа в трубе необходима для получения экспериментально зарегистрированных коэффициентов теплоотдачи. Для этого определим число Нуссельта

$$Nu_э = \frac{\alpha_э \cdot d}{\lambda_э}, \quad (1.23)$$

где  $d$  – определяющий размер, равный радиусу трубы, так как электрический ветер движется радиально от коронирующего провода к стенке и обратно. Воспользуемся формулой в критериальной форме для теплообмена при турбулентном движении газа в трубе [121].

$$Nu_э = 0,021 Re_э^{0,8} Pr_э^{0,43} \left( \frac{Pr_э}{Pr_c} \right)^{0,11}, \quad (1.24)$$

где  $Pr_э$  и  $Pr_c$  – соответственно числа Прандтля для воздуха вдали от стенки и число Прандтля на стенке реактора.

Так как численное значение числа Нуссельта из формулы (1.24) нам уже известно, то, преобразуя формулу (12), определим число Рейнольдса

$$Re_{\epsilon} = \left( \frac{Nu_{\epsilon}}{0,021 \cdot Pr_{\epsilon}^{0,43} \left( \frac{Pr_{\epsilon}}{Pr_c} \right)^{0,11}} \right)^{1,25} . \quad (1.25)$$

Теперь, зная число Рейнольдса, можно вычислить ту скорость, которая необходима для создания экспериментально наблюдаемого коэффициента теплоотдачи.

$$W = \frac{Re_{\epsilon}}{\nu \cdot d} . \quad (1.26)$$

Полученные скорости в 5,5–11 раз больше (табл. 1.1), чем дает формула Ланденбурга для электрического ветра. Чем объяснить такое большое расхождение?

Можно предположить, что если действительно в коронном разряде происходит достаточно сильная диссоциация молекулярного азота, то часть атомов азота, достигая стенки реактора, рекомбинируют на ней в молекулы, а тепло рекомбинации отдается в стенку. В этом случае и скорость электрического ветра может соответствовать формуле Ланденбурга, и коэффициент теплоотдачи принимать гораздо большие значения, чем без учета химических реакций.

Если скорость электрического ветра в реакторе соответствует формуле Ланденбурга, то вначале вычисляем по формуле (1.24) число Нуссельта, а затем, преобразуя формулу (1.23), вычисляем коэффициент теплоотдачи по Ланденбургу. При этом получается, что  $\alpha_{\text{л}} = 13,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Это меньше, чем вычислено по формуле (1.22) соответственно для импульсной, отрицательной и положительной корон в 9,1–6,9–5,1 раза. Значит, вклад в величину коэффициента теплоотдачи процесса от рекомбинации атомарного азота на водоохлаждаемой стенке является определяющим. Таким образом, целесообразно разделить суммарный коэффициент теплоотдачи на обычный, который назовем конвективным  $\alpha_{\text{к}}$  и рекомбинационным  $\alpha_{\text{р}}$ .

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{р}} . \quad (1.27)$$

Рекомбинационный коэффициент теплоотдачи для импульсной, отрицательной и положительной корон составляет соответственно 109, 46; 79, 22; 55, 06  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . В отсутствие вклада от рекомбинации атомарного азота, увеличивающего коэффициент теплоотдачи, для создания того же теплового потока через стенку к охлаждающей воде требуется в 5,1–9,1

раз больший перепад температур между стенкой и газом. Расчет показывает, что при этом температура газа внутри реактора должна составлять величину 60–70°C. При такой высокой температуре синтез озона в озонаторе практически прекращается. Таким образом, рекомбинация атомарного азота или других радикалов на теплообменной стенке, а не электрический ветер, вносит определяющий вклад в увеличение коэффициента теплоотдачи в коронных типах разрядов.

В плазмохимическом реакторе на основе коронных разрядов порядка 63 % подводимой мощности передается через охлаждаемый электрод в воду. Предполагается, что до 30% мощности выводится из системы газовым потоком, содержащим атомарный азот, остальное – тепловые потери через теплоизоляцию и энергия эндотермических реакций образования озона.

Интенсивный теплообмен в реакторе происходит в основном за счет рекомбинации атомарного азота на водоохлаждаемой стенке реактора. В 5–9 раз меньший вклад в суммарный коэффициент теплоотдачи, чем рекомбинация атомарного азота, вносит электрический ветер, возникающего в зоне разряда, что полностью определяет высокую эффективность синтеза озона в разрядах.

Оснащение теплообменников коронным разрядом способствует интенсификации теплообмена и как следствие приводит к снижению массогабаритных показателей технологических установок.

## **2. КОРОННЫЙ РАЗРЯД И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ**

Стальные канаты применяются при эксплуатации пассажирских лифтов, горно-шахтного оборудования, транспорта, ракетных установок, станков, сельскохозяйственной техники и т.д. Канаты различаются по форме, технологиям изготовления, количеству проволок и др. В процессе эксплуатации наиболее важным параметром стальных канатов является их надежность [122], которая определяется потерей среднего сечения и числом обрывов проволок. Среди многочисленных способов контроля широко применяется трудоемкий метод визуального подсчета обрывов проволок каната на длине одного шага свивки. При неразрушающем контроле стальных канатов используются электромагнитные методы дефектоскопии, основанные на оценке магнитного поля вдоль участка каната и регистрации распределения магнитного потока, изменяющегося из-за изменения площади сечения или обрыва проволок [123].

Разработка эффективных методов оперативного неразрушающего контроля обрыва проволок с помощью регистрации электрического тока коронного разряда как датчика информации о состоянии стального каната представляет научный и практический интерес.

Исследования состояния поверхности стального каната с помощью коронного разряда проводятся на экспериментальной установке (рис. 2.1.). Канат 1 с дефектом в виде порванной проволоки 2 протягивается через кольцевой электрод (датчик 3). Между канатом и кольцевым электродом создается электрическое поле с помощью высоковольтного источника питания (ВИП) [124]. При движении каната через кольцевой электрод обрыв провода приближается к датчику. У конца выступающего провода вблизи датчика напряженность электрического поля достигает критической величины, необходимой для формирования коронного разряда 4 и протекания электрического тока. Это позволяет зарегистрировать местоположение неоднородностей поверхности стальных канатов, связанных с разрывом отдельных проволок, и подсчитать их количество на одном шаге свивки.

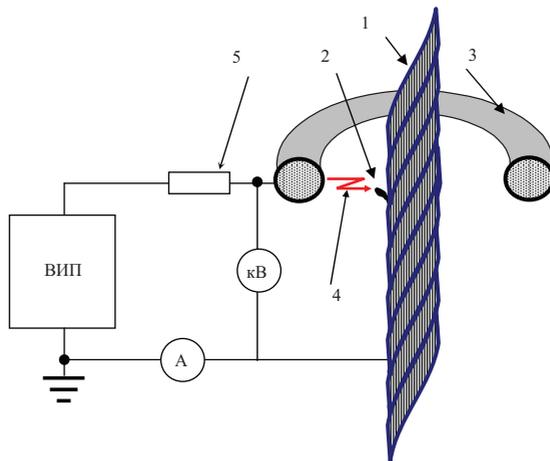


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки. 1 – канат; 2 – дефект каната; 3 – кольцевой электрод (датчик); ВИП – высоковольтный источник питания; 4 – коронный разряд; 5 – ограничивающее сопротивление, А – микроамперметр, кВ – киловольтметр.

Критическая напряженность электрического поля оценивается по формуле Пика [46, 47] и зависит от температуры, состава окружающего газа, диаметров каната и датчика. Например, в случае применения

стального каната диаметром 10 мм и датчика (внутренний диаметр 40 мм, толщина 13 мм) установлено, что в воздухе при нормальных условиях необходимое напряжение составляет 16 кВ. При более высоких напряжениях загорается коронный разряд с каната без дефектов, что осложняет регистрацию порывов проволок. Для предотвращения перехода коронного разряда в дуговой датчик соединяется с ВИП через ограничивающее сопротивление 5. Ток и напряжение разряда регистрируются микроамперметром и киловольтметром (рис. 2.1).

Важным элементом установки является датчик порывов проволок каната (рис. 2.2), состоящий из кольцевого проводящего электрода 1 и восьми диэлектрических полуколец 2. Кольцевой электрод подключен к высоковольтному источнику питания. Коронный разряд возникает между кольцевым электродом и дефектами каната (концами оборванных проволок). Диэлектрические кольца формируют электрическое поле таким образом, чтобы коронный разряд зажегся в момент нахождения концов обрывов проволок внутри кольцевого электрода, исключая возникновение разряда на дефектах, находящихся вне его. При движении стального каната регистрация электрического тока возникающего коронного разряда дает информацию о количестве обрывов проволок на единицу длины.

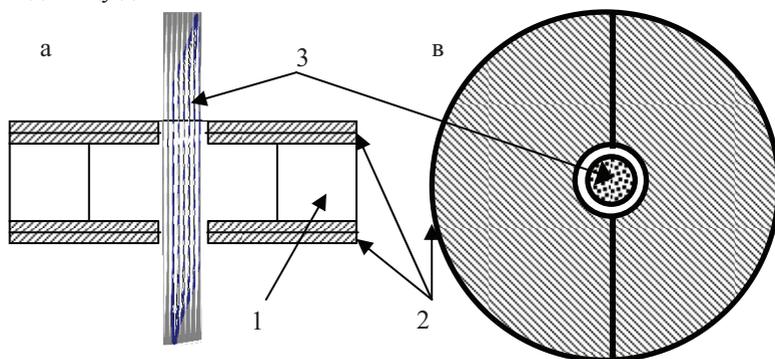


Рис. 2.2. Конструкция датчика порывов проволок каната (а – вид с боку; в – вид сверху): 1 – кольцевой электрод, 2 – восемь диэлектрических полуколец, 3 – стальной канат с дефектом (порыв проволоочки).

Для определения чувствительности метода к величине дефектов были созданы порывы проволок каната с различной длиной выступающих концов от поверхности каната  $l = 0; 0,5; 1; 2; 3; 4$  и  $5$  мм. Канат протягивался через кольцевой электрод с постоянной скоростью, а воз-

никновение коронных разрядов регистрируется по изменению величины электрического тока в разрядной цепи.

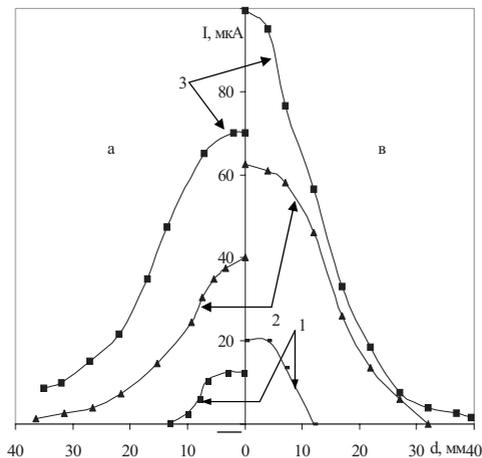


Рис. 2.3. Зависимость тока коронного разряда от положения дефекта ( $l = 0$  (1), 2 (2) и 5 (3) мм) относительно центра датчика:  
а – отрицательная корона, в – положительная корона.

Как следует из результатов измерений тока датчика без диэлектрических шайб (рис. 2.3), при постоянном напряжении 16 кВ для отрицательного (рис. 2.3 а) и положительного (рис. 2.3 в) коронных разрядов все зависимости электрического тока симметричны относительно центра датчика и даже порванная проволочка, не выступающая над канатом ( $l=0$ ), способна формировать коронный разряд. При прохождении через датчик стального каната с дефектами (наличие порывов проволок с различной длиной выступающей части) электрические токи короны превышает фоновые значения в несколько раз по сравнению с  $l=0$ , что подтверждает возможность регистрации порывов проволок. Величина максимального тока коронного разряда достаточна для однозначного определения наличия порыва проволоки. При регистрации близко расположенных порывов проволок каната чувствительность метода увеличивается, при использовании для измерений положительной короны, у которой максимальная величина электрического тока (для всех  $l$ ) больше, чем у отрицательной короны (рис. 2.3). Электрический ток коронного разряда начинает протекать в измерительной цепи до того, как дефект каната окажется внутри датчика (рис. 2.3). Поэтому для повышения разрешающей способности метода оптимизируются размеры датчика и на-

пряженность электрического поля применительно к конкретным размерам стальных канатов [125].

С целью локализации коронного разряда внутри датчика проводится его защита от преждевременного возникновения коронного разряда с помощью набора диэлектрических шайб (рис. 2.2), расположенных с двух сторон кольцевого электрода. Шайбы выполнены из диэлектрика с малыми электрическими токами утечки и способны работать в сильных электрических полях. Силы электрического тока разряда от расстояния между дефектом каната и центром датчика для двух электродов (с внутренним диаметром  $D=25$  (1) и 40 (2) мм) зависят от расположения диэлектрических шайб (рис. 2.4). В случае, когда шайбы расположены с одной стороны правая часть кривой имеет большую крутизну. Электрический ток становится пренебрежимо малым на расстояниях 7-8 мм до центра датчика. В левой части графика ток разряда составляет 15-20 мкА даже на расстоянии 20 мм от центра. Различие правой и левой частей зависимостей подтверждает возможность увеличения пространственной разрешающей способности метода путем локализации диэлектрическими шайбами коронного разряда внутри датчика.

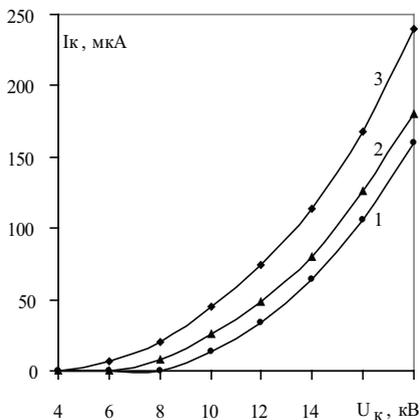


Рис. 2.4. Зависимости электрического тока отрицательной короны от расстояния между дефектом каната и центром датчика (внутренний диаметр датчика  $D=25$  (1) и 40 (2) мм). Диэлектрические шайбы расположены с правой стороны.

Проводятся измерения зависимости электрического тока положительной короны от расстояния между дефектами каната и центром

датчика в зависимости от числа порывов проволок (рис. 2.5). Кривая  $N=1$  построена для дефекта в виде одной разорванной проволоки, выступающей на 1 мм. Кривые  $N=2,3$  построены для дефектов в виде двух и трех порванных проволок. Расстояние между разрывами 2 мм вдоль оси каната. С обеих сторон датчика размещены диэлектрические шайбы. Из результатов эксперимента видно (рис. 2.5), что для одного обрыва проволок зависимость электрического тока от расстояния представляет симметричную кривую относительно центра датчика. При движении стального каната коронный разряд зажигается на расстоянии около 6 мм от центра датчика, а при прохождении каната через центр датчика на таком же расстоянии гаснет. При наличии двух и трех обрывов проволок на диаграммах наблюдаются ступеньки тока, которые соответствуют поочередному входу в датчик концов порванных проволок [4].

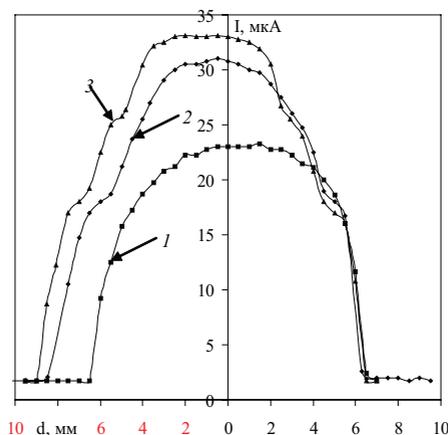


Рис. 2.5. Зависимости электрического тока положительной короны от расстояния до центра датчика, в зависимости от числа разрывов проволок:

$N=1$  (1),  $N=2$  (2),  $N=3$  (3). Расстояние между ними 2–3 мм.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения коронного разряда (положительной и отрицательной полярностей) для обнаружения порывов отдельных проволок стальных канатов. Поскольку измеряемой величиной является ток коронного разряда, выходной сигнал преобразуется в цифровой с помощью стандартного аналого-цифрового преобразователя, что позволяет автоматизировать процесс измерений. Метод позволяет проводить подсчет количества обрывов проволок на единицу длины стального каната с разрешением 0,5 мм между соседними обрывами.

### 3. ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

#### 3.1. Процессы ионизации в земной атмосфере

Наличие электрически заряженных частиц в атмосферном воздухе было обнаружено в начале века. Начиная с 30-х годов с распространением простейших счетчиков аэроионов при содружестве физиков, биологов, медиков были выполнены фундаментальные исследования, посвященные вопросам природы аэроионов. В приземном слое атмосферы, в естественных условиях, ионизация воздуха производится остаточным радиоактивным излучением земли и горных пород, чаще всего продуктами распада радия, например, радоном, доходящим до земли космическим излучением, путем объемной фотоионизации воздуха ультрафиолетовыми лучами, в том числе и рентгеновскими лучами, стеканием зарядов с острых предметов, в том числе и с иголок хвойных деревьев. Перед грозой или в море на кораблях явление стекания зарядов видно невооруженным глазом и получило название «огни святого Эльма». В процессе ионизации участвуют также грозы, пожары, распыляемые струи воды, например, водопады. Основным и наиболее стабильным источником ионизации атмосферного воздуха являются все же радиоактивное излучение земли и космические лучи, так как фотоионизация ультрафиолетовыми лучами Солнца происходит только днем, а остальные явления происходят эпизодически и не повсеместно.

Интенсивность образования ионов зависит, прежде всего, от места измерения, природных условий, времени суток и времени года, а также от температуры и давления воздуха, скорости ветра, осадков. А на спектр образуемых ионов существенно влияет наличие примесей в воздухе, т.е. загрязнение воздуха, туман, дождь, снег. В достаточно сухом и чистом воздухе преобладают легкие ионы, а в загрязненном воздухе, при наличии осадков, тумана, количество легких ионов может упасть до нуля, зато возрастет количество средних и тяжелых ионов [126].

Сам процесс ионизации достаточно сложен. При ионизации параллельно идет несколько процессов:

- непосредственное образование пар ионов за счет того, что ионизирующая частица или гамма-квант срывает с внешней орбиты нейтральной молекулы электрон, создавая, таким образом, положительный ион, а оторванный электрон тут же прилипает к первой молекуле, с которой он столкнется, и либо образует отрицательный ион, либо нейтрализует заряд, если молекула положительно заряжена;

- возбуждение молекул без образования ионов, при котором какой-то электрон, может быть и не один, выталкивается на более высокую орбиту, но не отрывается; встреча двух таких молекул приводит к тому, что они весь запас своей энергии вкладывают в освобождение одного из электронов на внешней орбите, возвращая за счет этого свои возбужденные электроны на прежние орбиты и превращаясь в положительный ион, а электрон, который покинул орбиту, начнет передавать при столкновениях с другими молекулами часть своей энергии этим молекулам, создавая тем самым иногда очень большое количество пар ионов, пока, растеряв всю энергию, окончательно не прилипнет к какой-либо нейтральной молекуле, создав тем самым еще один, но уже отрицательный ион;
- диссоциация молекул – это когда молекулы разбиваются на разнополярные ионы атомов или осколков молекулы, которые затем могут воссоединиться с подобной оторванной частью другой частицы и нейтрализоваться, либо вступить в реакцию с какой-либо нейтральной молекулой и образовать ион нового вещества. Подобным образом возникают молекулы озона, окислов азота и так называемый оксоний (в переводе – ион) – это молекула воды, к которой пристал положительно заряженный протон водорода, у которого забрали, содрав с орбиты, единственный электрон;
- перезаряд ионов при встрече иона какого-то вещества с нейтральной молекулой, имеющей более низкий потенциал ионизации, в результате чего нейтральная молекула станет ионом, а ион превратится в нейтральную молекулу.

Все эти ионы называются первичными, так как они представляют собой заряженные атомы или молекулы и живут в таком состоянии не более  $10^{-7}$  секунды, то есть одну десятиллионную долю секунды.

Ионы по размерам подразделяются на легкие ( $6,6 \times 10^{-8}$  см в диаметре), промежуточные ( $6,6-250 \times 10^{-8}$  см), тяжелые (ионы Ланжевена,  $250-270 \times 10^{-8}$  см) и ультратяжелые ( $570 \times 10^{-8}$  см) [127].

После стадии образования первичных ионов время их существования составляет от  $10^{-7}$  секунды до 100, а иногда и более секунд. В это время первичные ионы, сталкиваясь с нейтральными молекулами различных газов, способных хоть немного поляризоваться, удерживают их вокруг себя некоторое время (от  $10^{-6}$  секунды для обычных газов до  $10^{-4}$  секунды для углекислого газа и до  $10^{-3}$  секунды – для воды).

У положительного иона заряд в виде протона расположен в центре иона. Вокруг такого иона постоянно в соприкосновении находится от 13 до 20 молекул (в сухом воздухе) и от 11 до 15 молекул (во влажном воздухе).

Отрицательный ион имеет на своей внешней орбите лишний электрон, и к нему сначала присоединяется поляризованная молекула, а затем вокруг этих двух молекул собираются в виде тора 6–8 нейтральных молекул (в сухом воздухе) или 5–7 молекул (во влажном воздухе). Эти молекулы все время соприкасаются с отрицательным ионом и также непрерывно заменяются другими нейтральными молекулами. За время существования вторичные ионы попадают прежде всего под действие электрического поля земли, образованного ее отрицательным зарядом.

У поверхности земли напряженность этого поля в среднем равна 130 В/м, хотя на самом деле она имеет большой разброс в зависимости от места измерения. Так в Павловске (Слуцке) под Санкт-Петербургом и в Вашингтоне она равна 179 В/м, Давосе (США) она равна 64 В/м [128].

С ростом высоты над уровнем земли напряженность поля падает. Под действием этого электрического поля положительные ионы движутся к земле, а отрицательные – в верхние слои атмосферы. Поэтому у земли положительных ионов несколько больше, чем отрицательных, а в верхних слоях атмосферы – наоборот. Ветры и циркуляция воздуха перемещают ионы своими потоками [128].

Непрерывно идет процесс рекомбинации ионов, т.е. нейтрализация зарядов двух встретившихся разнополярных ионов. Установлено, что самыми устойчивыми в смысле постоянства внешней оболочки являются ионы оксонима  $\text{H}_3\text{O}^+$  в окружении молекул воды, которые из-за наличия сил поляризации не расстаются с полюбившимся ионом до самой его смерти, т.е. нейтрализации его заряда ионом другой полярности. Среди отрицательных ионов таких стойких ионов обнаружено не было.

В ходе существования и массовых столкновений с другими молекулами каждый ион, если он не рекомбинировал, встречается либо с крупным конгломератом молекул, не имеющим заряда, либо с твердой микрочастицей – взвешенным в воздухе ядром конденсации.

Ион прилипает к такой частице, и, в зависимости от массы частицы, превращает ее либо в средний, либо тяжелый, либо сверхтяжелый ион.

К тому же электрическое поле земли очищает воздух от таких заряженных частиц, забирая себе положительно заряженные частицы и отсылая вверх отрицательно заряженные, где они становятся ядрами конденсации воды и вместе с дождями падают на землю [128].

### 3.2. Роль естественной и искусственной ионизации воздуха

Исследования электрических компонентов внешней среды, в частности ионизация воздуха, имеют большое значение для оценки биологического влияния этих факторов, выявления их роли в эволюционном развитии животного мира, а также анализа механизмов действия с целью объяснения тех изменений в организме, которые могут наблюдаться в разнообразных помещениях с резким нарушением количественной и качественной характеристики электрических факторов.

Гигиенические и клинико-физиологические исследования, проведенные в производственных помещениях со сниженным уровнем аэроионизации, показали наличие выраженных изменений функционального состояния жизненно важных систем организма человека. В связи с этим возникла необходимость нормализации нарушенной микроэкологии, т.е. компенсация аэроионной недостаточности [129].

По вопросу биологического действия аэроионов существуют две гипотезы. Согласно первой гипотезе, выдвинутой Л.Л.Васильевым в 1934 г., физиологическое действие аэроионов объясняется наличием электрогуморального обмена, состоящего из двух фаз – фазы легочного и фазы тканевого электрообмена. Предполагалось, что аэроионы приносятся воздушным потоком в легкие и через мембраны проникают в кровь. Вдыхание отрицательных аэроионов, по мнению автора, способствует повышению естественного заряда коллоидных и клеточных элементов крови и, следовательно, стимулированию всех реакций в организме. Действие положительных аэроионов, напротив, способствует понижению заряда коллоидных и клеточных элементов крови и, таким образом, оказывает угнетающее влияние на все функции организма. Вторая гипотеза, предложенная Е.М. Чернявским в 1959 г., предполагает, что в процессе ионизации изменяется состояние основных газов воздушной среды ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ), которые в дальнейшем, обладая иными физико-химическими свойствами, через легкие воздействуют на организм. Высказанные положения о наличии электрогуморального обмена почти для всех исследователей являлись единственной теоретической предпосылкой для изучения действия ионизированного воздуха на организм животного и человека. При этом основное внимание было уделено исследованию влияния только отрицательных ионов. Однако Л.Л. Васильев как основоположник теоретических представлений физиологического действия аэроионов подчеркивал, что созданная им теория

электрогуморального обмена для объяснения действия на организм ионизированного воздуха не является окончательной и требует своего дополнения, совершенствования, а может быть, и изменения. Дальнейшие исследования основывались на том методологическом принципе, что ионизированный воздух, т.е. постоянное наличие в открытой атмосфере положительных и отрицательных аэроионов, является экологической средой для организма и поэтому требуется изучение влияния на организм биполярной аэроионизации [129–131].

Разработаны определенные нормативы по содержанию ионов для нормальной жизнедеятельности человека [132–135]. Они появились из-за немалых неприятностей от деионизации воздуха в современных зданиях с центральным кондиционированием. По санитарно-гигиеническим нормам минимальное число положительных ионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха должно быть равно 400, отрицательных – 600. Оптимальным считается содержание 1500–3000 положительных и 3000–5000 отрицательных ионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха.

За многие годы исследований по воздействию легких аэроионов на организм человека выработалось ориентировочное разделение уровней концентраций аэроионов.

В течение длительного времени разрабатывались средства контроля ионизации и методы создания искусственной ионизации воздуха. Основоположником искусственной аэроионологии и ее практического применения является известный советский ученый Александр Леонидович Чижевский – один из основоположников космической биологии [136–139].

### **3.3. Естественная аэроионизация**

В биологическом воздействии горного воздуха на организм человека одним из определяющих факторов является повышенная аэроионизация, что признается в медицинской климатологии, спелеотерапии, геронтологии [130, 140–142]. Однако во многих горных регионах лечебно-оздоровительное действие аэроионов мало учитывается.

Мониторинг по различным районам Средней Азии проводился еще в 60-е годы прошлого века. Исследования показали, что Средняя Азия и отдельные ее районы, вследствие особенностей климатического характера, неустойчивого горообразования, радиоактивного фона, наличия горных рек и водопадов, отличаются локальным разнообразием и особенностями ионного распределения. В среднем эти значения для рав-

нинных пространств до высоты 300–400 м дают значения концентрации ионов до 1200 для положительных и 1000 для отрицательных в  $\text{см}^3$ , при униполярности 1,2–1,3; на высоте 600–800 м соответственно 1400–1200 ионов, при униполярности 1,3–1,4; на высотах 1200–1400 м соответственно 1800–1200 ионов в  $\text{см}^3$  при униполярности 1,5–1,6. Таким образом, ионизация воздуха с высотой растет, вместе с тем увеличивается положительная полярность воздуха. На более высоких уровнях (до трех-четырех километров высоты), как показывают многолетние наблюдения на Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории, а также обсерватории на леднике Федченко, сохраняются те же соотношения с соответствующим увеличением как концентрации ионов, так и их униполярности. Однако в высокогорных условиях, особенно на леднике Федченко, а также в районах со специфическими особенностями метеорологических и геофизических условий, как, например, в местах с увеличенным радиоактивным фоном, концентрация ионов доходит до десятков тысяч при переменной униполярности. Аналогичные колебания элементов атмосферного электричества можно наблюдать в других районах Средней Азии при наличии горных рек и водопадов. Так, на высоких берегах горных рек в зависимости от высоты наблюдается концентрация ионов для положительных до 2000–3000 в  $\text{см}^3$  и 1000–2000 отрицательных ионов при униполярности 1,8–1,2. По мере снижения к долине, в направлении к берегам горных рек, концентрация ионов убывает. Однако по мере приближения к горной реке и у самой реки, в местах наибольшего распыления воды, концентрация ионов снова возрастает, доходя до нескольких тысяч в  $\text{см}^3$  [131].

Изучение естественной аэроионизации в Киргизии проводилось только разовыми экспедициями в 1935 г. (Е.А. Чернявский) и 1969 г. (ЦНИИ курортологии и физиотерапии). Высокие концентрации ионов (порядка десятков тысяч в  $1\text{см}^3$ ) в подземных полостях и у бурных рек не изучались.

В Кыргызстане исследования по естественной аэроионизации в горной местности систематически проводились в 1980–2000 г. инженером А.А. Ибрагимовым. Изучение аэроионизации проводили методом маршрутных измерений и круглосуточных с интервалом в один час. Концентрацию аэроионов измеряли портативным аэрометром конструкции А.А. Ибрагимова. Наземный атмосферный воздух исследовали на средних высотах. Как известно, в горах и предгорье концентрация аэроионов в связи с горно-долинной циркуляцией воздуха в течение суток плавно меняется, возрастая при горном и убывая при долинном

ветре, но, как установлено, с некоторым скачком при каждой перемене направления ветра. В табл. 3.1 приведены концентрации легких аэроионов в отдельных пунктах среднегорья Киргизии (суточное колебание в приземной атмосфере), меньшие значения соответствуют концу долинного ветра (концу дня), максимальные – утренним часам. Характерными для данной местности оказались показатели измерений на открытых или возвышенных участках территории. Измерения вблизи наземных строений и деревьев с подветренной стороны дают заниженные результаты [143].

Таблица 3.1

№ пункта	Пункт наблюдения	Высота (м) над уровнем моря	Концентрация легких аэроионов, на 1 см <sup>3</sup>	
			n <sup>-</sup>	n <sup>+</sup>
1	Южная окраина г. Фрунзе (Парк Дружбы)	820	180-650	170-800
2	Ущелье Аламедин (зона отдыха «Горячие ключи»)	2000	650-1800	600-1700
3	Курорт «Иссык-Ата» (возвышенность)	1800	800-1800	700-1650
4	Соляная шахта «Чон-Туз» (склон горы)	2100	800-2000	700-1800
5	Зона отдыха Кадамджайского комбината (открытый участок)	1100	350-710	200-700
6	Детский санаторий «Ак-Су»	2000	800-1900	700-2000

Спелеолечебница «Чон-Туз» расположена вблизи с.Чолпон на высоте 2000 м над уровнем моря. На рис.3.1 внизу дана развернутая по прямой схема маршрутных измерений концентрации аэроионов вдоль подземной горизонтальной трассы при естественной циркуляции воздуха – от рабочего входа через обогатитель до лечебных палат (с выходом через приемное отделение).

Обогатитель представляет собой изометрическую камеру давних соляных разработок с предельными размерами 60-80 м. По мере продвижения от входа концентрация легких аэроионов каждого знака (тонкие сплошные линии) повышается максимально в просторной части обогатителя. В дальнейшем в зоне лечебных полей при естественной циркуляции воздуха концентрация легких ионов снижается, что можно объяснить осаждением ионов на стенках и арматуре вентиляционного штрека. В обогатителе обнаружены высокие концентрации и тяжелых ионов – заряженных аэрозоль (на рисунке показаны толстыми линиями).

ми), при их значении в наружном воздухе 300-400 в  $1 \text{ см}^3$ . Они меньше теряются в пути из-за меньшей подвижности. Изучение динамики аэроионов в лечебнице «Чон-Туз» свидетельствует о необходимости более полного использования ионизации, а также выяснения резервов и механизмов ионообразования в соляных камерах. В целом аэроионный режим в высокогорных соляных штольнях выгодно отличается от режима в глубоких шахтах [143].

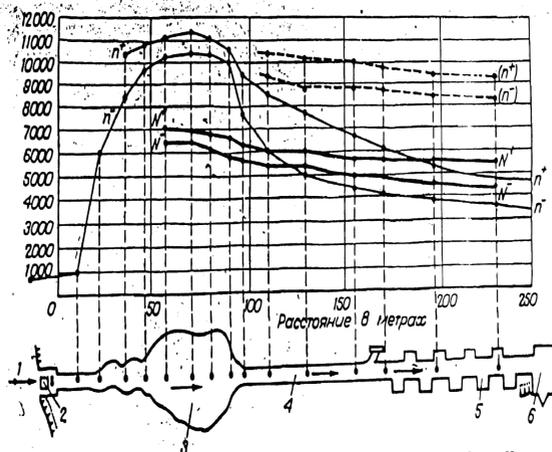


Рис. 3.1. Концентрация аэроионов по трассе измерения в штольнях спелеолечебницы «Чон-Туз». По оси абсцисс — расстояние в м, по оси ординат — концентрация аэроионов, ион/см<sup>3</sup>. Сплошные линии — при естественной циркуляции воздуха, пунктирные — после включения вентилятора (через 1 ч). 1 — рабочий выход; 2 — вентилятор; 3 — обогатитель; 4 — вентиляционный штрек; 5 — лечебные палаты; 6 — приемная.

С целью установления содержания аэроионов обследованы три карстовые пещеры Киргизии. Пещера «Теплая» в зоне отдыха Кадамджайского сурьмяного комбината имеет узкий проход длиной 97 м, оканчивающийся на глубине 25 м гротом (1100 м над уровнем моря). В гроте температура 22°C, влажность 100%, имеется небольшое озеро с пресной водой,  $n^-$  и  $n^+$  — соответственно 6800 и 5000 э.з./см<sup>3</sup> (в наружном воздухе — 400 и 350 э.з./см<sup>3</sup>). Характеристики пещеры «Арпальк» — искусственной горизонтальной штольни:  $n^-$  12400-15000 э.з./см<sup>3</sup>,  $n^+$  12800-15000 э.з./см<sup>3</sup>. Пещера «Гипсовая» — карстовая, находится на высоте 950 м над уровнем моря, температура 19°C, влажность 60-80%. Концентрация аэроионов равномерно высока по всей горизонтальной части:  $n^+$  32000-33000 э.з./см<sup>3</sup>,  $n^-$  22000-23000 э.з./см<sup>3</sup> (в наружном воздухе

п 800 э.з/см<sup>3</sup>). Очевидно, уровень ионизации в пещерах зависит не только от высоты над уровнем моря. Для каждой горной пещеры существует свой, специфический механизм формирования аэроионного режима.

Во всех изученных соляных и карстовых пещерах на высоте 1000-2000 м над уровнем моря обнаружены высокие концентрации легких аэроионов, в десятки раз превышающие наружные, при меньшей радиации. Эти и другие факты говорят о существовании 3-го вида естественных аэроионов (спелеоаэроионы), отличающихся носителями зарядов (молекулы микроэлементов из породы) [144].

Гидроаэроионизацию у горных рек и водопадов исследовали на разном отдалении от места распыления воды (табл. 3.2). Наиболее высокие концентрации обнаружены на реке Ак-Суу Иссык-Кульской области, для которой характерно более бурное течение, чем для рек Иссык-Атинка, Аламедин. При всех замерах положительных гидроионов оказалось в 4–5 раз меньше, чем отрицательных, что указывает на чистоту горной воды.

Таблица 3.2

Река и зона измерения	Расстояние от места распыления воды (м)	Концентрация легких ионов, э.з/см <sup>3</sup>	
		отрицательные	положительные
Иссык-Атинка – зона курорта	1	3000 – 5000	800 – 1000
	2	1800 – 2800	500 – 700
Аламедин – зона отдыха «Горячие ключи»	1	5000 – 6000	1200 – 1500
	2	3000 – 4500	не измеряли
«Ак-Суу» – зона детского санатория	1	7000 – 20000	1000 – 4000
	2	5000 – 12000	не измеряли

Проведенные исследования аэроионного режима среднегорья Киргизии, включая подземные полости, свидетельствуют о биологически благоприятном, высоком уровне ионизации этих районов, что может быть использовано в лечебных и оздоровительных целях. Исследование естественной аэроионизации высокогорья является необходимым элементом оценки экологической среды, климатических и микроклиматических условий и требует дальнейшего углубления и расширения [144].

Аэроионы в горной местности можно разделить на три класса: 1 – атмосферные ионы (собственно горный воздух); 2 – гидроаэроионы (горные реки и водопады); 3 – спелеоаэроионы (горные пещеры). Понятие «горный климат» всегда связано с горным воздухом. Целебность горного воздуха обусловлена повышенной ионизацией, обретаемой в верхних слоях атмосферы. Но и в горах концентрация легких аэроионов

(КЛАИ) может снижаться даже десятикратно, до самых неблагоприятных значений. КЛАИ зависит от горно-долинной циркуляции, от часов суток и погодных факторов.

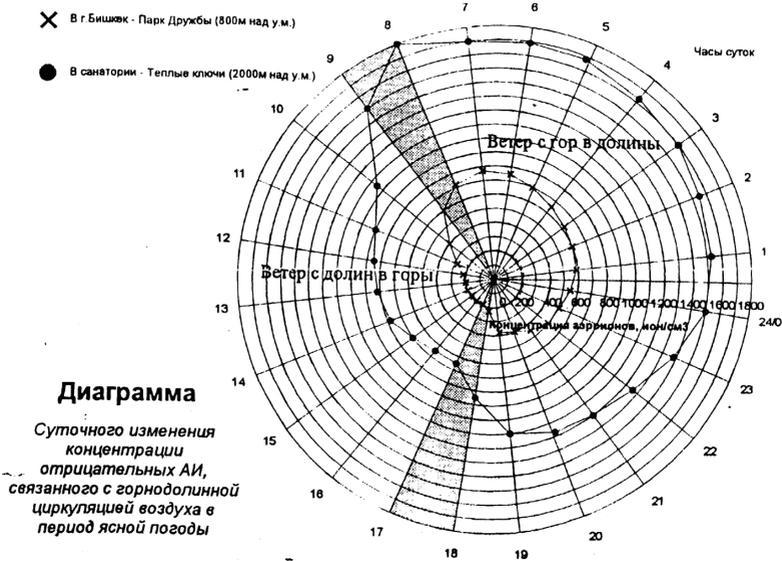


Рис. 3.2. Диаграмма суточного изменения концентрации отрицательных аэроионов, связанного с горнодолинной циркуляцией воздуха в период ясной погоды.

По многолетним наблюдениям при каждом сочетании погодных элементов, характерном для данной местности, устанавливается одна и та же КЛАИ даже через годы. На этой основе нами разработана форма номограммы для оценки КЛАИ по погоде. Она строится на основе многодневных инструментальных наблюдений и помогает грамотно организовать климатотерапию в условиях антропогенного загрязнения, снижающего КЛАИ. Суточные изменения концентрации отрицательных аэроионов, связанных с горнодолинной циркуляцией воздуха в период ясной погоды, мы предлагаем отображать в виде диаграмм. На рис.3.2 показана подобная диаграмма для г. Бишкек – парк Дружбы и санаторий «Теплые ключи».

Целебное действие горного воздуха, горных рек и водопадов, горных пещер в значительной мере связано с аэроионизацией различного уровня и с разными носителями зарядов. В существующих климатолечебницах Кыргызстана эти факторы оставлены без достаточного

внимания. Необходимо грамотно использовать ресурсы естественной аэроионизации, особенно в горной местности. Кажется разумным на территориях горных санаториев завести карты концентраций аэроионов и графики их суточного изменения в связи с горно-долинной циркуляцией воздуха. По этим картам можно выбирать целесообразные маршруты в часы лечебных прогулок или мест для приема воздушных процедур и так далее. Организация ближних и дальних маршрутов вдоль бурных рек должна стать активной формой гидроаэроионотерапии [145].

Важным элементом развития санаторно-курортной деятельности Кыргызстана должна стать организация мониторинга характеристик атмосферного электричества подобна той, которая проводится в России.

### **3.4. Способы создания искусственной ионизации в воздухе**

Для выяснения качества искусственно ионизированного воздуха были исследованы все возможные виды ионизаторов [131].

**Термоэлектронные аэроионизаторы.** Принцип действия аэроионизаторов этого типа основан на использовании термоэлектронной эмиссии раскаленных металлов при их нагревании до высокой температуры (500.2000С). Освобождение электронов из металла требует затраты определенной энергии, называемой обычно «энергия выхода» или «работа выхода».

**Радиоизотопные аэроионизаторы.** Принцип действия аэроионизаторов этого типа основан на свойстве лучей радиоактивных веществ ионизировать воздух.

**Фотоэлектрические аэроионизаторы.** Принцип действия аэроионизаторов этого типа основан на использовании коротковолновых ультрафиолетовых лучей, испускаемых ртутно-кварцевыми лампами. Наиболее известны конструкции аэроионизаторов Я.Ю.Рейнета и А.К.Гумана. Фотоэлектрические аэроионизаторы не получили широкого распространения.

**Гидродинамические аэроионизаторы.** Принцип действия гидродинамических аэроионизаторов (гидроаэроионизаторов) основан на баллоэлектрическом эффекте, заключающемся в электризации мельчайших капель жидкости, возникающих при дроблении и распылении воды. Гидроаэроионизатор представляет собой чашу, в верхней части которой находятся трубки, заканчивающиеся распылителями. Вытекающие из распылителей струи воды ударяются о корборундовый диск, в

результате чего происходит баллоэлектрический эффект. Концентрация легких аэроионов, возникающих при этом, зависит от давления воды, вытекающей из распылителей.

**Коронные аэроионизаторы.** В аэроионизаторах этого типа воздух ионизируется посредством коронного разряда, образующегося вблизи острия или тонкой проволоки при напряжении в несколько тысяч вольт.

Сравнительные характеристики аэроионизаторов разных типов приведены в табл. 3.3. [131].

Таблица 3.3

Тип ионизатора	Достоинства	Недостатки
Термоэлектронные	Безопасность пользования	Малая генерирующая способность; Повышение температуры воздуха; Большая потребляемая мощность; Малый срок эксплуатации излучателя; Загрязнение воздуха частицами тонкодисперсной пыли
Радиоизотопные	Отсутствие побочных продуктов; Варьирование коэффициента униполярности	Присутствие радиоактивных излучений
Фотоэлектрические	—	Большая потребляемая мощность; Низкая продуцирующая способность; Генерация в высокой концентрации биологически активных газов
Гидродинамические	Простота устройства; Безопасность при работе; Экономичность	Концентрация аэроионов зависит от химического состава воды; Гидроаэроионизаторы, не снабженные подогревателями, вызывают неприятное ощущение холодного воздуха
Коронные	Высокая производительность; Возможность варьировать производительностью; Высокая униполярность; Возможность предельно снизить концентрации озона и окислов азота; Нет влияния на микроклимат	Высокое напряжение на электродах; Необходимо подбирать напряжение на электродах так, чтобы убрать заметные концентрации озона и окислов азота

Из анализа табличных данных следует, что самым лучшим способом аэроионизации является ионизация посредством коронного разряда. В настоящее время все ионизаторы воздуха работают на коронном разряде.

### **3.5. Ионизация воздуха коронным разрядом отрицательной полярности**

Анализ литературы по способам ионизации воздуха коронным разрядом отрицательной полярности в условиях больших разрядных промежутков, а так же поиск по действующим ионизаторам в Интернете показывает наличие большого многообразия решений ионизирующего узла прибора. Проводятся определенные исследования в направлении оптимизации излучателей ионов [146, 147].

Известны коронирующие электроды в виде тонких проводов, натянутых по периметру комнаты, большого количества близко расположенных острий, или протяженных плоских проводников с выступами. В литературе слабо обосновывается необходимость подобных конструкций коронирующего электрода, а также не приводятся данные по наработке озона в помещении подобными устройствами. Поэтому всестороннее исследование влияния конструктивных факторов ионизирующего блока на процесс ионизации в помещении и скорость наработки озона в нем является актуальной задачей.

Для проведения исследований решались следующие задачи:

1. Создать компактный высоковольтный источник питания отрицательной полярности с заземлением через питающую цепь.
2. Разработать универсальную кассету для коронирующего блока, позволяющую в широком диапазоне изменять количество электродов.
3. Оснастить экспериментальную установку необходимыми предметами измерения параметров разряда.
4. Изучить электрические характеристики ионизатора в зависимости от конструктивных параметров коронирующего блока.
5. Исследовать распределения концентрации ионов и озона, генерируемые прибором, в помещении.
6. Определить динамику наработки озона в помещении в течение длительного периода времени работы ионизатора.

**Экспериментальная установка.** Ионизатор воздуха (рис. 3.3) состоит из четырех основных частей: источника высокого напряжения постоянного тока, электрофильтра на основе коронного разряда излучателя аэроионов и вентилятора электрически соединенных между собой и объединенных в диэлектрический корпус.

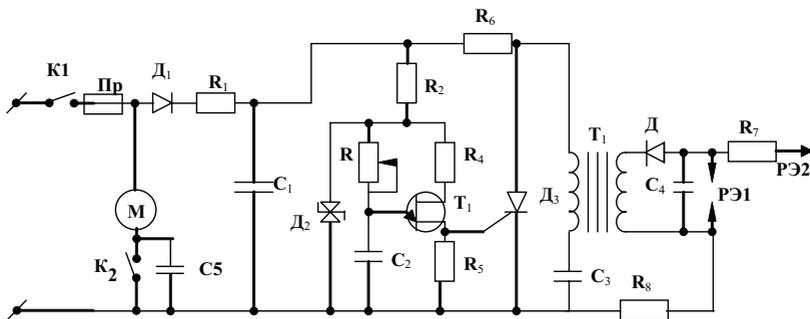


Рис. 3.3. Принципиальная схема ионизатора. Д<sub>1</sub>-Д226Б, Д<sub>2</sub>-Д814 Г, Д<sub>3</sub>-КУ202Н, Д<sub>4</sub>-КЦ106Г, Т<sub>1</sub>-КТ117А, R<sub>1</sub>-100 Ом, R<sub>2</sub>-60 кОм, R<sub>3</sub>-30кОм, R<sub>4</sub>-1 кОм, R<sub>5</sub>-100 Ом, R<sub>6</sub>-10 кОм, R<sub>7</sub>-1 Гом, R<sub>8</sub>-1 Гом., C<sub>1</sub>-100 мкФ, C<sub>2</sub>-0,1 мкФ, C<sub>3</sub>-0,1 мкФ, C<sub>4</sub>-4700 пФ, М-вентилятор, Т<sub>1</sub>-ТВС-110ЛА1.

При замыкании переключателя К1 напряжение сети подается на вентилятор М, скорость вращения которого регулируется в некоторых пределах подключением последовательно к двигателю вентилятора конденсатора С5 путем размыкания ключа К2. Напряжение сети через токоограничивающий резистор R1 и диод Д1 заряжает конденсатор С1 до амплитудного значения 310 В. Одновременно заряжаются конденсатор С2 через резистор R2, R3 и С3 через резистор R6. Напряжение с конденсатора С2, которое нарастает по экспоненте, подается на эмиттер однопереходного транзистора Т<sub>1</sub>. В момент, когда это напряжение достигает порога переключения транзистора в открытое состояние, конденсатор С<sub>2</sub> разряжается через цепь эмиттер-база 1, резистор R<sub>5</sub>, управляющий электрод тиристора Д<sub>2</sub>. Тиристор отрывается и конденсатор С<sub>3</sub> начинает разряжаться через первичную обмотку высоковольтного импульсного трансформатора Т<sub>1</sub>.

При полном разряде конденсатора тиристор Д<sub>2</sub> закрывается и весь процесс заряда и разряда конденсаторов С<sub>2</sub>, С<sub>3</sub> повторяется в автоколебательном режиме. Во вторичной обмотке трансформатора Т<sub>1</sub> в это время присутствуют высоковольтные импульсы, выпрямляемые с помощью диода Д3 и конденсатора С4. Выпрямленное высокое напряжение подается на разрядные узлы РЭ1 и РЭ2. В источнике питания путем изменения величины сопротивления R3 можно в конечном итоге менять частоту коммутации конденсатора С3 и тем самым увеличивать или уменьшать мощность в разряде.

Разрядные электроды РЭ1 являются электрофильтром аэрозольных и дисперсных частиц. Конструктивно фильтр выполнен в виде плоско-

го электрода (30 x 220 мм), над поверхностью которого расположен коронирующий проволочный электрод ( $l=200$  мм,  $d=0,25$  мм). В целях обеспечения безопасности эксплуатации фильтр размещен внутри диэлектрического корпуса прибора перпендикулярно воздушному потоку, создаваемого вентилятором.

Разрядные электроды РЭ1, являющиеся излучателями аэроионов, выполнены в виде острий и располагаются на лицевой части ионизатора. В целях безопасности электроды разделены от источника питания сопротивлениями  $R_7 - C3-5$  15 кВ 1 Гом,  $R_8 - C3-5$  15 кВ 1 Гом. При напряжении источника питания 7 кВ при случайном прикосновении человека к излучателю через него пойдет ток величиной 3,5 мкА, что является безопасным уровнем.

Таким образом, работа прибора осуществляется следующим образом: вентилятор засасывает воздух из помещения и прогоняет его через электрофильтр, где воздух очищается от пыли и аэрозольей, выходящий из корпуса прибора воздух попадает в зону генерации аэроионов, где происходит смешение воздушного потока с наработанными ионами отрицательной полярности, далее ионизированный воздух транспортируется по помещению.

**Методы измерений.** Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью подключаемых к схеме (рис. 3.3) электростатического киловольтметра и микроамперметра.

Для определения концентрации озона в газовом потоке прибора использовался йодометрический метод, относящийся к объемным методам химического анализа.

Концентрация ионов определялась методом аспирационного конденсатора. Суть метода заключается в следующем: исследуется изменение скорости разрядки воздушного конденсатора, через который продувается исследуемый воздух. Ионы, оказавшиеся в воздушном потоке, перемещаются вместе с ним и одновременно смещаются в электрическом поле конденсатора, осаждаясь на его обкладках. При этом разрядка конденсатора происходит одновременно через входное сопротивление осциллографа или вольтметра и за счет осаждения ионов. Чем больше число последних в воздухе, тем быстрее происходит разрядка конденсатора, тем более крутой будет кривая разрядки.

Сравнение кривых разрядки дает возможность определить ток ионов в измерительном конденсаторе, а затем и их концентрацию. Также анализируя кривые разрядки, можно определить качественный состав воздушного потока.

Конденсатор представляет собой плоский наборный воздушный конденсатор, состоящий из нескольких плоскопараллельных металлических пластин, покрытых с одной стороны диэлектрической пленкой для разделения зарядов.

**Электрические характеристики.** На рис. 3.4 показаны зависимости тока ионизатора от напряжения для различного числа коронирующих электродов, установленных в кассете. Видно, что увеличение тока происходит при увеличении напряжения, кривые носят экспоненциальный характер, что характерно для коронного разряда. Максимальный ток ионизатора составляет 120 мкА при числе коронирующих электродов 54.

Наблюдается непропорциональный рост тока с увеличением числа электродов (рис. 3.5) при одинаковых напряжениях, что обусловлено взаимной экранировкой электрического поля соседними электродами.

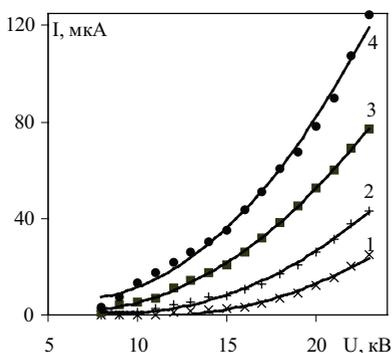


Рис. 3.4. Вольтамперные характеристики ионизатора. Для 1 – 2, 2 – 16, 3 – 30, 4 – 54 коронирующих электродов.

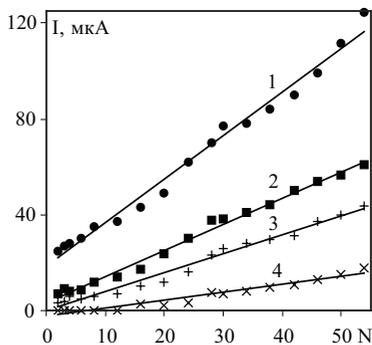


Рис. 3.5. Зависимость тока от числа коронирующих электродов. Для напряжений: 1 – 23; 2 – 18; 3 – 16; 4 – 11 кВ.

Для выяснения целесообразности использования большого количества коронирующих электродов были сняты характеристики одиночного коронирующего острья, расположенного вне кассеты.

Вольтамперная характеристика для одного коронирующего электрода приведена на рис. 3.6. Ток одиночной короны оказывается значительно больше тока 54-х коронирующих электродов, объединенных в одну кассету. Токи существенно выше, это обусловлено тем, что происходит экранирование зарядов при использовании всей коробки с электродами.

Из проведенных исследований следует, что излучатель аэроионов необходимо выполнять в виде одиночного коронирующего острья,

либо группы острий, каждая из которых расположена на значительном расстоянии друг от друга. Подобная конструкция излучателя позволит избежать взаимной экранировки поля от соседних электродов и воздействия объемного ионного заряда на структуру электрического поля короны вблизи коронирующих электродов [148].

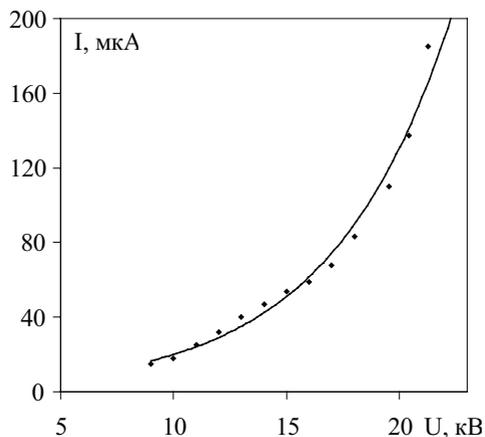


Рис. 3.6. Вольтамперная характеристика одного коронирующего электрода ионизатора.

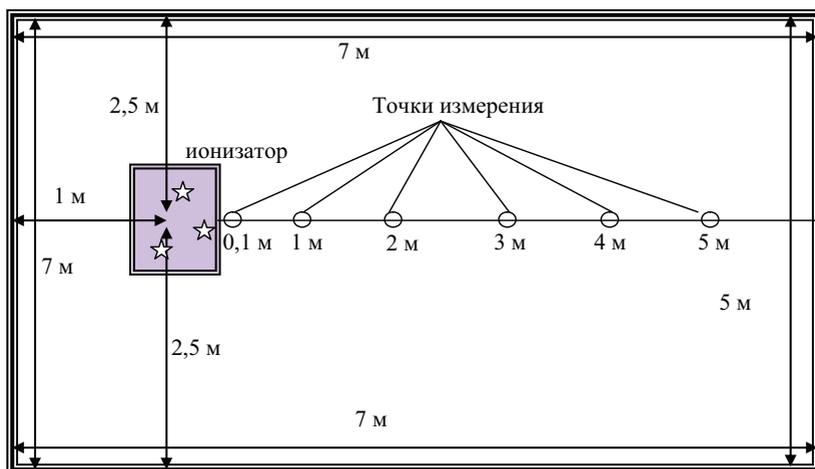


Рис. 3.7. План помещения и точки измерения концентрации озона и аэроионов в воздухе, создаваемых ионизатором.

Наработка ионизатором озона в производственном помещении.

Определение концентрации аэроионов и озона проводилось на различных расстояниях от прибора в производственном помещении размером: длина 7 м, ширина 5 м, высота 2,8 м и объем 98 м<sup>3</sup>. Во время измерений исключалась искусственная и естественная вентиляция помещения.

Концентрация озона определялась через 5, 10, 20, 40, 80, и 160 минут после включения прибора на расстояниях от прибора 0,1 м, 1 м, 2 м, 3 м, 4 м и 5 м. Прибор располагался в помещении на высоте 1 м. Схема размещения ионизатора в помещении показана на рис. 3.7.

На рис. 3.8 приведены зависимости изменения концентрации озона в помещении от расстояния от ионизатора и времени его работы.

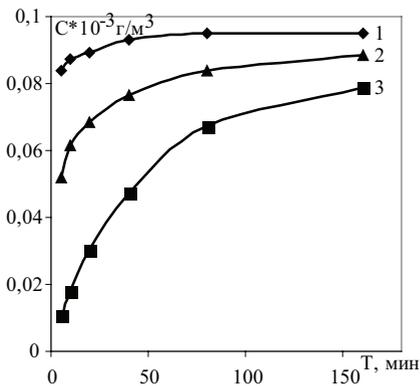


Рис. 3.8. Зависимость концентрации озона в помещении от расстояния до ионизатора. 1—1, 2—2, 3—5 м.

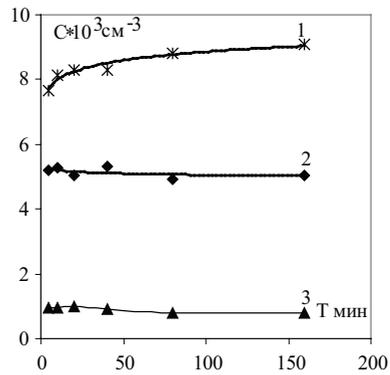


Рис. 3.9. Зависимость концентрации аэроионов от расстояния от ионизатора и времени его работы. 1—0,1 м, 2—1 м, 3—4 м.

Зависимость показывает, что максимальная концентрация озона наблюдается на расстоянии 10 см от ионизатора. Содержание озона возрастает до 0,092 г/м<sup>3</sup> через 50 минут работы прибора и далее в течение времени не меняется. Это связано с наступлением баланса между наработкой озона прибором и его разрушением на механических и биологических примесях лабораторного воздуха. Ход зависимостей для других расстояний имеет аналогичный характер.

Предельно допустимая концентрация озона в рабочих и бытовых помещениях составляет 0,1 мг/м<sup>3</sup>. Проведенные исследования показали, что работа прибора не нарушает санитарно-гигиенических требований к воздуху, так как максимальная концентрация озона, создаваемая при-

бором ( $0,092 \text{ г/м}^3$ ), ниже предельно допустимой концентрации. Поэтому созданный ионизатор может работать в помещениях объемом от  $98 \text{ м}^3$  и более в непрерывном режиме.

На рис. 3.9 приведена зависимость концентрации отрицательных аэроионов в помещении от расстояния от ионизатора и времени работы прибора.

Зависимость показывает, что профиль распределения концентрации аэроионов в помещении устанавливается в первые десять минут и не зависит от времени работы прибора. Только для малых расстояний ( $0,1 \text{ м}$ ) наблюдается увеличение концентрации до  $9000$  ионов через  $2$  часа работы ионизатора.

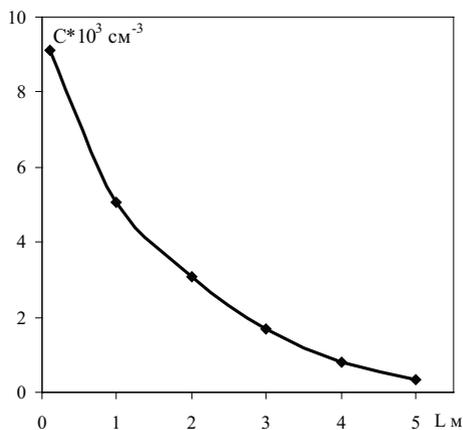


Рис. 3.10. Зависимость концентрации отрицательных ионов в помещении от расстояния до ионизатора.

На рис 3.10 приведена зависимость концентрации отрицательных аэроионов в помещении от расстояния до прибора в направлении, совпадающим с потоком воздуха от ионизатора. Изменение концентрации носит нелинейный характер и быстро уменьшается с  $9000$  до  $300$  ионов на  $\text{см}^{-3}$ . Тем не менее интервал полученных концентраций удовлетворяет гигиеническим нормам Минздрава Российской Федерации, в которых указывается, что для поддержания нормальных физиологических процессов в организме человека в окружающем воздухе должно содержать отрицательных аэроионов в количестве  $600\text{-}5000 \text{ см}^{-3}$ .

**Заключение.** Для эффективной работы ионизатора необходимо соединять положительный полюс высоковольтного источника питания

с физической землей через бытовую сеть электропитания. Если питание ионизатора автономное, то нужно в конструкции прибора предусматривать клемму заземления или зануления положительного полюса источника питания. В целях предотвращения поражения электрическим током при соприкосновении с коронирующим электродом заземление производится через сопротивление, величина которого определяется напряжением высоковольтного источника питания и безопасным током для человека ( $\sim 5$  мА).

Слаботочные ионизаторы воздуха целесообразно оснащать одним коронирующим электродом в виде острия, удаленного на расстояние 10 см от изолирующих частей устройства. Создание излучателей ионов в виде набора большого количества заостренных электродов является нецелесообразным в виду запирающего действия короны объемным отрицательным зарядом вблизи группы коронирующих электродов.

Уровень ионизации, создаваемый одиночным коронирующим электродом, составляет величину порядка  $5000$  ион/см<sup>3</sup>, которая является лечебной концентрацией ионов. Концентрация озона при длительной работе ионизатора не превышает предельно допустимой концентрации. Разработанная конструкция ионизатора в зависимости от поставленных целей может быть использована для лечения и профилактики.

## **4. КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НИТРИДА КРЕМНИЯ**

### **4.1. Использование технологий СВС для получения керамики на основе кремния**

Синтез сжиганием – это одно из новейших направлений материаловедения [149]. Для управления процессом синтеза кремния сжиганием необходимы химические реакции, происходящие между частицами порошковой смеси и окружающей газообразной среды. При самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) возникают сложные явления, связанные с массопереносом (диффузия компонент, выделение и распределение энергии экзотермической реакции, изменение температуры и т. д.).

При сжигании кремния с использованием газообразного азота получают материалы нитридной керамики, а в кислороде или воздухе – оксидной керамики. Горение ультрадисперсного порошка кремния в воздухе или азоте при нормальных условиях не происходит из-за недостат-

ка окислителя. Для проведения подобной реакции необходимо высокое давление реагирующего газа. Один из путей достижения предела воспламенения при нормальных давлениях является проведение реакции в жидком азоте или реализация СВС на порошках кремния сверхнизкой плотности. По оценкам необходимая относительная плотность порошка кремния должна составлять величину порядка 4%, что соответствует насыпной плотности 100 кг/м<sup>3</sup>.

СВС-процесс выгодно отличается от других методов синтеза керамических материалов высокой скоростью нагрева компонентов системы и очень быстрой реакцией между ними. В процессе синтеза сжиганием на микроуровне происходит локальный разогрев участка поверхности частицы порошка кремния, в результате чего начинается экзотермическая реакция взаимодействия твердой фазы частицы с газовым окружением. Такие локальные реакции характеризуются интенсивным энерговыделением и сопровождаются развитием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Рассмотрим частицу, на поверхности которой начинается экзотермическая реакция. Выделяющаяся при реакции энергия частично удаляется из реакционной системы (излучение и теплоперенос в окружающую среду), а частично расходуется на разогрев самой частицы. При малой теплоотдаче температура частицы быстро повышается, что ведет к резкому самоускорению реакции. Такие системы давно известны, и их поведение описывается теорией теплового взрыва [150].

Происходит поджигание всей частицы кремния, в результате чего температура системы резко повышается и начинается распространение реакции в режиме самовоспламенения. Возможность поджигания зависит от ряда факторов: экзотермичности реакции, значений коэффициента теплопроводности, энергии.

Течение процесса горения зависит от количества газового реагента в зоне реакции и от соотношения скоростей фронта волны горения и полойной «пропитки» частиц порошка этим реагентом. Если повышения температуры в процессе распространения волны горения достаточно для расплавления и спекания образовавшихся продуктов, то характер процесса может существенно измениться, так как при спекании пористость вещества значительно уменьшается и газовая пропитка становится малоэффективной.

После внешнего поджига и локального нагрева смеси формируется широкая зона предварительного нагрева, которая и определяет характер распространения волны горения. Это так называемый автоколеба-

тельный режим горения. Численный расчет механизма такого процесса описан в работе [150], а экспериментальные исследования конкретных систем – в работе [151].

При автоколебательном режиме горения температура в объеме смеси изменяется периодически, в результате чего формируется характерный «скачкообразный» режим послойного сгорания образца, который легко наблюдается визуально. Теплота, выделяющаяся в зоне реакции, переносится в зону предварительного нагрева, что обеспечивает высокую скорость процесса. В частности, если диффузия вещества протекает медленнее термодиффузии, то в зоне реакции выделяется значительно больше избыточной энергии, чем в стационарной волне горения [152, 153].

Предварительные эксперименты свидетельствуют о перспективности разработки СВС технологии для получения тонкодисперсных порошков нитрида кремния. Организация низкоплотных структур из УДП кремния позволяет реализовать процесс СВС в системе кремний – кислород – азот при нормальных условиях. При этом образуются оксиды, нитриды или их смеси в зависимости от состава газовой среды. Осуществляя сжигание кремния с использованием газообразного азота, получают материалы нитридной керамики, а в кислороде или воздухе – оксидной керамики. Варьирование концентрации кислорода позволяет управлять кинетикой процесса СВС, полнотой протекания химических реакций и спеканием компонентов [154].

В этой связи представляет интерес использование объемных гетерогенных газовых потоков, содержащих ультра- и нанодисперсные частицы для инициации реакций горения. Коронный разряд в гетерогенном потоке газа позволяет активировать частицы кремния и запустить реакцию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при атмосферном давлении.

На рис. 4.1 приведена технологическая схема получения изделий из порошковых материалов. Подготовка сырья осуществляется в заданной газовой атмосфере ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , Ar). Особенность метода заключается в предварительной активации каждой частицы и последующем формировании в сильных электрических полях материалов со структурой объемных фрактальных кластеров. Активация исходного порошка осуществляется по нескольким направлениям в зависимости от типа получаемых материалов [155].

Эффективность работы плазмохимических реакторов на основе разрядов в гетерогенных потоках определяется степенью загрузки плаз-

менного потока твердой фазой, поэтому актуальным является поиск и разработка методов создания гетерогенных потоков газа с необходимой массовой загрузкой. Синтез сжиганием представляет собой реакционное взаимодействие поверхностей частиц кремния с газом, распространяющееся вдоль сформованного из порошка материала. В связи с этим особую роль приобретают форма и размер частиц порошка, существенно влияющие на механизмы распространения реакции.



Рис. 4.1. Технология CVC спекания керамических материалов.

Температуру газа в тлеющем разряде и период нахождения частиц в зоне разряда можно отрегулировать так, чтобы химическая реакция образования, например, нитридов успевала происходить, а разложение этого нитрида под действием высокой температуры – нет. В горячей зоне разряда частицы кремния очищаются, а в относительно холодной зоне идет реакция образования нитридов. Размеры частиц будут тем меньше, чем меньше размеры частиц на входе в зону тлеющего разряда. Наночастицы удаляются из газового потока через электрофилтры; для предотвращения слипания частиц используют коронный разряд «горящий» на электропроводную жидкость. Из полученных порошков формируют изделия.

## 4.2. Создание оптимальных гетерогенных потоков в плазмохимических реакторах

В настоящее время большой интерес представляют объемные гетерогенные разряды в газе (атмосферном воздухе, азоте, кислороде), содержащем активную добавку в виде субмикронных порошковых материалов (проводников или полупроводников). В подобных системах легко инициируются реакции горения введенной конденсированной фазы. Результатом данных реакций являются наноразмерные оксидные и нитридные материалы. Полученные материалы обладают уникальными теплофизическими свойствами и находят широкое применение в технике. Рассматриваемые разряды являются основой для построения модели шаровой молнии, где внутренним источником энергии являются экзотермические реакции горения частиц [156].

Высокая эффективность работы плазмохимических реакторов на основе гетерогенных разрядов определяется степенью загрузки плазменного потока твердой субмикронной фазой. По нашим расчетам (на примере кремния) содержание последнего в газовом потоке должно составлять величину порядка  $200 \text{ г/м}^3$ . Создание пылевых потоков с данной загрузкой при крупности частиц более  $5 \text{ мкм}$  не представляет труда. В случае субмикронных частиц исходный порошок представляет собой агломераты со средним размером  $10\text{--}20 \text{ мкм}$ , из которого не удастся получить запыленные потоки газа традиционными методами (кипящий слой, просыпка порошка через газовую струю), средняя запыленность в данном случае составляет  $10\text{--}15 \text{ г/м}^3$ . Поэтому актуальным является поиск и разработка методов создания гетерогенных потоков газа (с субмикронной твердой фракцией) с необходимой массовой загрузкой.

Структура субмикронных порошков после помола становится плотной. Частицы сцеплены между собой и образуют конгломераты достаточно высокой прочности. Попытки организовать СВС в смеси кислород-азот при нормальных условиях не привели к успеху. Это объясняется тем, что из-за плотно сцепленных между собой частиц порошка кремния предел воспламенения не достигается. Кроме этого, высокая плотность порошка ограничивает доступ окислителя во внутрь системы (одно из условий протекания СВС). Поэтому для сжигания металлов необходимо иметь порошки, обладающие малой насыпной плотностью.

Для электростатического формирования сверхнизкоплотного порошка кремния на промежуточной стадии необходимо иметь воздушный поток, содержащий частицы кремния во взвешенном состоянии. Тради-

ционными методами получить подобные потоки не удастся из-за сильной агломерации порошка. В связи с этим возникла необходимость разработки метода создания воздушных взвесей мелкодисперсного порошка.

Нами разработан вихревой способ создания взвесей ультрадисперсных порошковых материалов. Принципиальная схема устройства для создания гетерогенных потоков показана на рис. 4.2. Сжатый воздух, азот, кислород или их смеси из баллонов 1 или с помощью компрессора после ротаметров 2 подаются через входной патрубок 3 в циклон 4. В камеру циклона помещается необходимое количество порошка 7. При тангенциальной подаче воздуха в камере циклона возникает вихревое движение газа, которое увлекает за собой порошок. В результате движения крупные агломераты порошка, ударяясь о стенки камеры, разбиваются на более мелкие. В результате трения о стенки частицы заряжаются и за счет кулоновских сил, превосходящих центробежную, отталкиваются от основной массы и вместе с воздухом через выходной патрубок 5 уходят из камеры в виде гетерогенного потока 6. Загрузка газового потока определяется конструктивными параметрами и расходом газа-носителя [157].

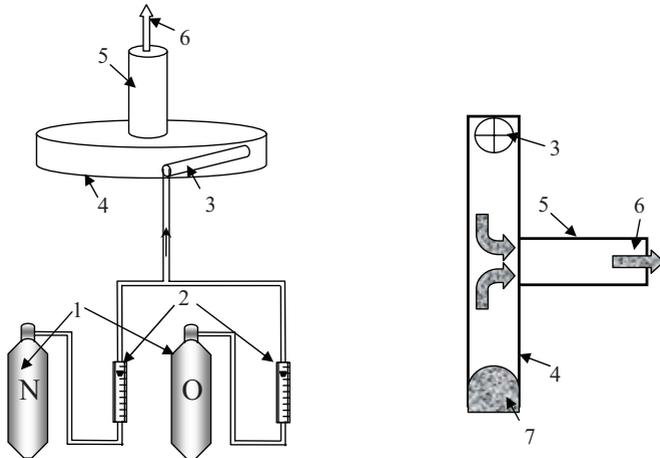


Рис. 4.2. Принципиальная схема устройства для создания гетерогенных потоков. 1 – баллоны со сжатым газом; 2 – ротаметры; 3 – входной патрубок; 4 – циклон; 5 – выходной патрубок; 6 – гетерогенный поток; 7 – субмикронный порошковый материал.

Качество разделения частиц в газовом потоке определялось путем электростатического осаждения частиц из газового потока на белую бу-

магу и последующего исследования осадков под микроскопом. Наблюдения показали полное отсутствие агломератов частиц в осадках. Что говорит о высоком качестве деагломерации субмикронных порошков при их вихревом движении в циклоне.

Зависимость производительности циклона от расхода транспортирующего газа (рис. 4.3) носит явно выраженный нелинейный характер. Это, вероятно, объясняется фракционной отгонкой пыли в течение эксперимента.

Полученная зависимость вскрывает следующие недостатки данного способа создания гетерогенных потоков: 1 – малая загрузка газового потока пылевыми частицами ( $\sim 100 \text{ г/м}^3$ ); 2 – фракционная отгонка; 3 – неравномерность плотности гетерогенного потока во времени. Данные недостатки могут успешно использоваться, например, для классификации частиц по размерам. Если рассматривать процесс выноса частиц во времени, то в первую очередь в потоке будут присутствовать самые мелкие частицы. Осаждение частиц из потока в разное время позволяет выделить частицы нужного размера. Кроме того, длительное пребывание порошка в циклоне позволяет производить домол исходного материала до субмикронного размера. Время пребывания порошка в циклоне регулируется диаметрами циклона и выходного патрубка.

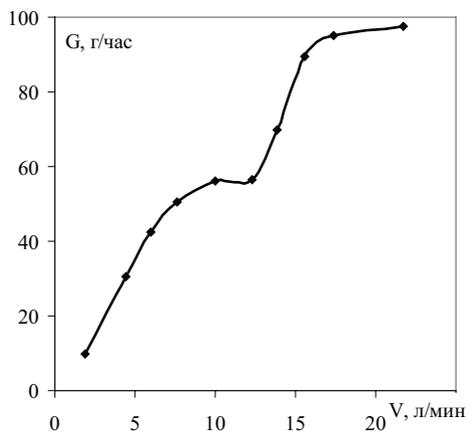


Рис. 4.3. Зависимость производительности циклона от расхода транспортирующего газа.

С целью увеличения загрузки газового потока, исключения фракционной отгонки и стабилизации плотности гетерогенного потока циклон

снабжается шнековым питателем. При этом минимизируются диаметры циклона и выходного патрубка. Входной патрубок изготавливается таким образом, чтобы обеспечить максимальные скорости вращения газа в циклоне при заданном расходе и давлении транспортирующего газа. Принципиальная схема и опытный образец питателя изображены на рис. 4.4. Герметичная цилиндрическая камера 1 соединена со шнеком 2 посредством сварных соединений. В камере через герметичные вводы установлена мешалка 3, препятствующая слеживанию порошков в процессе эксперимента. Периодическое вращение мешалки в прямом и обратном направлении позволяет полностью использовать порошковый материал 4 для экспериментов. При вращении шнека порошок перемещается в камеру циклона 5. Транспортный газ подается через патрубок 6 в циклон. Гетерогенный поток выходит из циклона через патрубок 7 для дальнейшей переработки. Стабильная работа дозатора обеспечивается наличием линии выравнивания давления 8 в камере дозатора и выходном патрубке циклона.

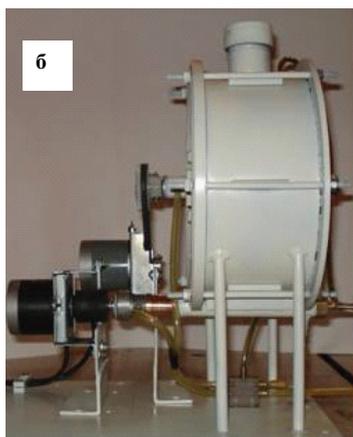
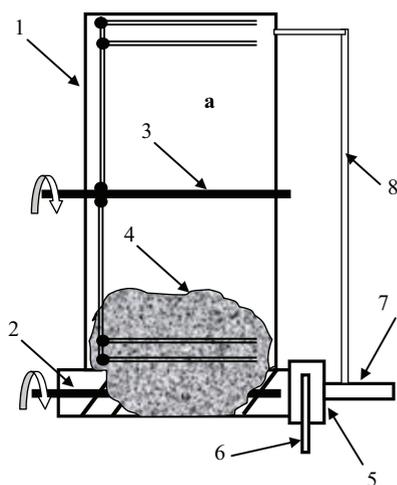


Рис. 4.4. Принципиальная схема (а) и опытный образец (б) питателя. 1 – цилиндрическая камера, 2 – шнек, 3 – мешалка, 4 – порошковый материал, 5 – камера циклона, 6 – входной патрубок, 7 – выходной патрубок, 8 линия выравнивания давления.

Разработанный питатель успешно прошел испытания на порошках различной крупности и сыпучести (в том числе и на трудносыпучих порошках типа угля, муки, субмикронные порошки кремния). Отличитель-

ной особенностью устройства является отсутствие зависимости расхода порошка от массы засыпанного продукта в камеру и времени работы. Регулирование производительности дозатора и величины загрузки гетерогенного потока изменяется в широком диапазоне расходом транспортирующего газа и частотой вращения шнека.

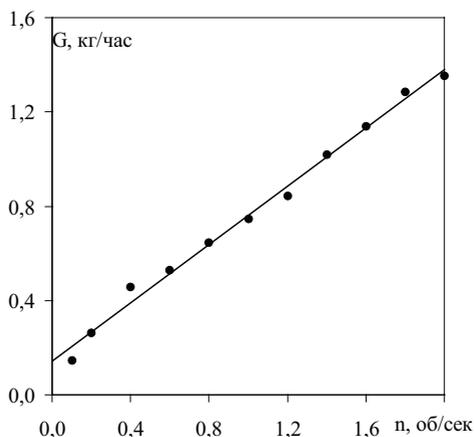


Рис. 4.5. Зависимость производительности питателя  $G$  от частоты вращения шнека  $n$ .

Зависимость производительности питателя от частоты вращения шнека при постоянном расходе транспортирующего газа 5 л/мин показана на рис. 4.5. Производительность практически линейно изменяется в диапазоне 200 – 1200 г/час при изменении частоты вращения шнека от 0,2 до 1,5 об/сек., что очень удобно при калибровке дозатора. Загрузка газового потока может изменяться от 0,1 до 4 кг/м<sup>3</sup> транспортирующего газа.

### 4.3. Активация порошковых материалов в коронном разряде

Особенности процесса сжигания материалов, в частности кремния, при СВС-синтезе обусловлены физическими свойствами порошков. В данном случае определяющим фактором, влияющим на ход СВС-процесса, является плотность порошкового кремния, имеющего свойство конгломерироваться. Даже после циклонного разуплотнения частички порошка кремния, при осаждении, вновь могут образовать конгломерированный массив с вышеуказанными свойствами затрудненного инициирования

СВС-процесса. Для избегания данного отрицательного явления, учитывая электропроводность порошка кремния, предложено при выходе из циклона производить зарядку частиц порошка, что с высокой долей вероятности может привести к формированию массива порошкового кремния с низкоплотной структурой, вследствие кулоновского взаимодействия электрически нейтральной либо заряженной обратным, относительно заряда частичек, знаком подложки с частицами порошка. В данном случае решено использовать зарядку частиц кремния в поле коронного разряда как наиболее рациональную по простоте и изящности применения.

Как известно, при горении униполярного коронного разряда межэлектродный промежуток визуально делится на две области: коронирующий электрод окружен характерным свечением, называемым короной или коронирующим слоем. Эта область разряда носит название генерационной, ионизационной или активной. В генерационной зоне коронного разряда происходят ионизационные процессы, особенности которых зависят от полярности короны. Во второй области короны, которая носит название «внешней» и занимает практически весь межэлектродный промежуток, происходит основной перенос заряда. Данное обстоятельство позволяет, пропуская гетерогенный поток через межэлектродный промежуток производить искомую зарядку частиц, что приводит к осаждению заряженных частиц на подложке.

При пропускании гетерогенного потока через плазму коронного разряда происходит процесс прилипания ионов к частицам кремния, знак которых зависит от полярности разряда. Вследствие этого появляется кулоновская составляющая силы, действующей на частицы, направленные в сторону подложки. В итоге, частицы кремния движутся по параболе к подложке и, соприкасаясь с ней, отдают избыточный заряд и затем заряжаются до потенциала подложки. Так как кремниевый порошок является электропроводным, то в электрическом отношении подложка с осажденным порошком является в высокой степени однородной, что позволяет последующим подлетающим частицам взаимодействовать с подложкой по такой же схеме. По истечении определенного промежутка времени, в конкретном случае 20 мин, на подложке образуется низкоплотный слой порошка кремния конечной толщины.

Эксперименты по активации порошков производились на установке (рис. 4.6). Высоковольтный источник питания 1 с выходным напряжением 0-20 кВ подключается к разрядной ячейке 2. Ячейки различной геометрии располагаются в герметичной камере осаждения порошка кремния в плазме коронного разряда 3. На установке были проведены

работы по экспериментальному определению влияния характеристик разряда и конфигурации разрядной ячейки на параметры осажденного кремния, в частности плотность и структуру.

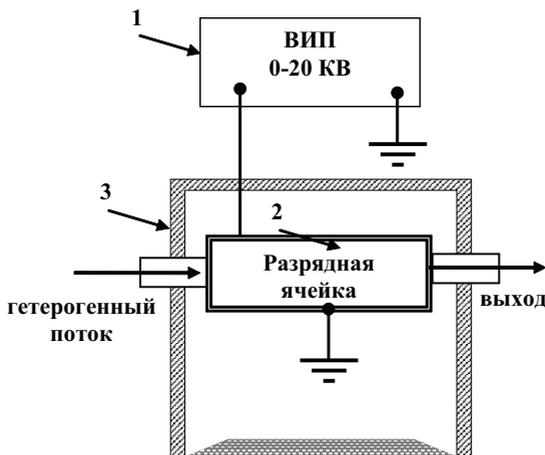


Рис. 4.6. Схематичное изображение установки для активации порошковых материалов. 1 – высоковольтный источник питания, 2 – разрядная ячейка, 3 – герметичная камера.

Из имеющегося множества конфигураций разрядной ячейки для реализации коронного разряда (острие-плоскость, острие-полусфера, провод-плоскость, коаксиальная геометрия и т.д.) для данной задачи выбор ограничивается необходимостью получения протяженной, в направлении движения гетерогенного потока, области заполненной плазмой. Основываясь на данном требовании, были построены две разрядные ячейки (рис. 4.7) следующих конфигураций: «провод-цилиндр» коаксиальной конструкции (рис. 4.7 а) и «провод-плоскость» (рис. 4.7 б) способные, по геометрическим параметрам, быть помещенными в камеру осаждения кремниевого порошка. Коронирующий провод в ячейках диаметром 0,2 мм из вольфрама, диаметр цилиндрического электрода 57 мм, межэлектродное расстояние в плоской геометрии 30 мм.

Целью данных экспериментов является определение оптимальных параметров коронного разряда для получения низкоплотной структуры и оптимальной конфигурации разрядной ячейки, позволяющей обеспечить полное сгорание кремния при проведении СВС-реакции.

Зависимость плотности осажденного порошка  $\rho$  от тока коронного разряда  $I_k$  (для геометрии провод-плоскость) показана на рис. 4.8.

В интервале токов 50–200 мкА плотность осажденного порошка кремния минимальна  $\sim 0,1$  г/см<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение тока короны приводит к резкому возрастанию плотности осадков до 0,8 г/см<sup>3</sup>. При последующем повышении тока короны картина стабилизируется и дальнейшего роста плотности осажденного порошка не наблюдается. Увеличение тока короны сопровождается ростом напряженности поля в разрядном промежутке, которое приводит к большему ускорению заряженных частиц порошка, вследствие чего происходит механическое разрушение и уплотнение массива. Максимальная плотность осадков имеет конечный предел при токах короны в 250 мкА и выше, со значением плотности порядка 0,9 г/см<sup>3</sup>.

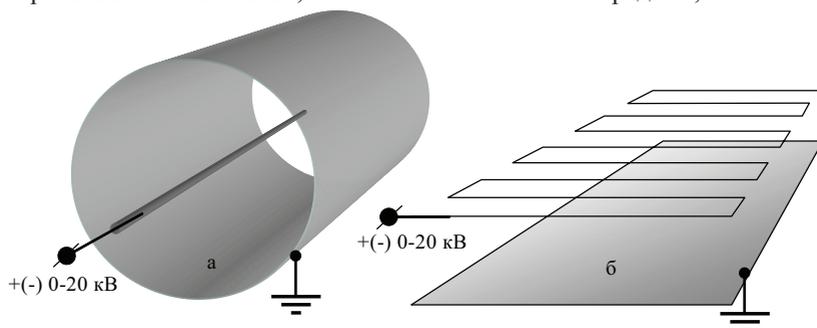


Рис. 4.7. Разрядные ячейки коаксиальной (а) и «провод-плоскость» (б) геометрии.

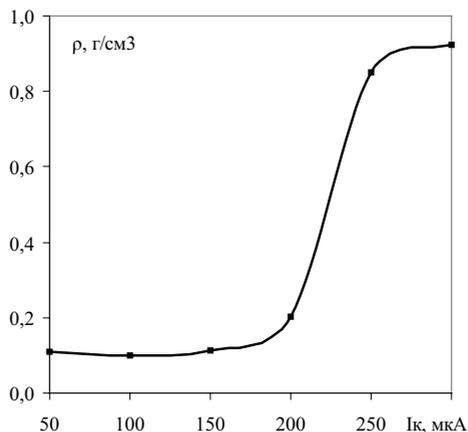


Рис. 4.8. Зависимость плотности осажденного порошка  $\rho$  от тока коронного разряда  $I_k$

Для успешного проведения СВС-горения порошкового кремния необходимо получение массива с низкоплотной структурой. Из проведенных экспериментов следует, что оптимальное значение тока коронного разряда находится в пределах 50–200 мкА. Конкретный выбор значения тока короны производится из необходимости получения требуемой толщины осажденного слоя за определенное время.

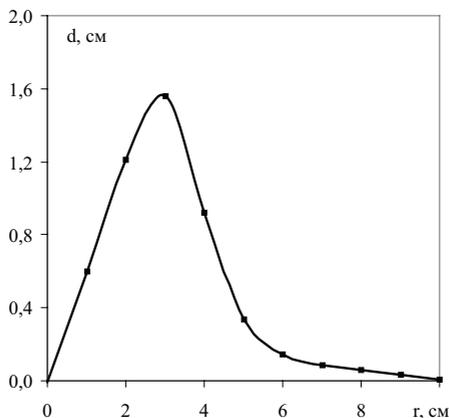


Рис. 4.9. Зависимость толщины слоя  $d$  от расстояния  $r$  для коаксиальной конструкции разрядной ячейки.

Для исследования процесса горения порошка кремния необходимо иметь образцы достаточно большой площади с равномерной толщиной слоя по поверхности осаждения. Конфигурация разрядного контура существенно влияет на распределение порошка кремния по поверхности осаждения. В коаксиальной геометрии разрядной ячейки толщина осажденного кремния  $d$  имеет максимум на расстоянии  $r=3$  см от входа в разрядную ячейку (рис. 4.9). На расстоянии 6 см практически весь кремний осаждается на стенках цилиндрического электрода. Данная геометрия разрядного промежутка является не совсем удачной для проведения последующих исследований. Но для полного улавливания частиц из гетерогенного потока ячейка коаксиальной геометрии является идеальной.

Слои низкоплотного порошка кремния однородной толщины по поверхности электрода легко получают в конфигурации разрядного промежутка «провод-плоскость» (рис. 4.10). Гетерогенный поток необходимо вводить в разряд со стороны коронирующих электродов. В диапазоне токов разряда 50–400 мкА наблюдаются слои равной толщины по всей поверхности плоского электрода размером 50 на 100 мм.

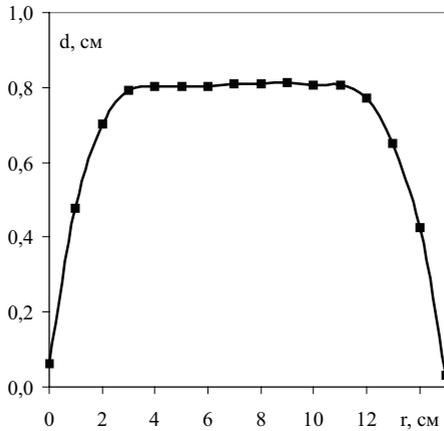


Рис. 4.10. Зависимость толщины слоя  $d$  от расстояния  $r$  для конструкции ячейки «провод-плоскость».



Рис. 4.11. Структура напыленного кремния.  
Ув. 1.



Рис. 4.12. Структура напыленного кремния.  
Ув. 8,6.

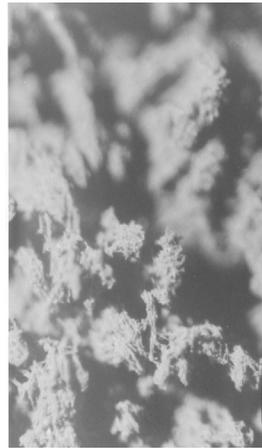


Рис. 4.13. Структура напыленного кремния.  
Ув. 54.

Структура получаемых слоев порошка кремния, осажденных в ячейке «провод-плоскость», показана на рис. 4.11–4.13. Низкоплотный порошок кремния формировался на дюралюминиевой пластине размером 5 на 10 см, толщина пластины 0,5 мм. Высота напыленного слоя кремния составляла 5 мм. Структура слоя очень рыхлая с большим ко-

личеством пор. Наблюдаются хаотично расположенные нитевидные образования из частиц кремния. Подобная структура содержит большое количество реагирующего газа и легко пропускает окислители внутрь порошка осажденного кремния и стимулирует СВС [158].

#### **4.4. Проведение СВС в контролируемых условиях**

В литературе по СВС-технологиям указывается чрезвычайная простота оборудования применяемая для СВС-синтеза [159]. Как правило, стандартные установки, используемые для данных целей, имеют лишь емкость, изготовленную из материалов, способных сохранять химическую инертность в условиях протекания СВС. Обусловлена данная простота оборудования особенностями самого СВС, не потребляющая внешнюю энергию для поддержания реакции и в большинстве случаев не требующая специальных условий проведения. Большинство СВС проводится при нормальных условиях в обычной атмосфере.

Однако в случае кремниевого порошка протекание СВС-процесса осложнено из-за затрудненного проникновения окислителя внутрь напыленного порошка. В результате этого для полного протекания СВС необходимо проводить процесс в условиях с повышенной концентрацией окислителя для лучшего его проникновения внутрь порошка. Данное требование может быть достигнуто путем нагнетания окислителя в камеру либо путем предварительной откачки воздуха из нее и последующей подачей окислителя. В первом случае при повышенном давлении СВС протекает быстро по поверхности порошка в связи с повышенной концентрацией окислителя в объеме и практически неизменной его концентрации внутри порошка. Во втором же случае во время откачки воздуха происходит его частичное удаление из массы порошка кремния, а при последующей подаче окислителя в камеру происходит улучшенное проникновение окислителя в порошок, в результате чего СВС протекает по всему объему порошка и, следовательно, более полно. В таких случаях необходимо иметь возможность создавать и контролировать условия, в которых протекает реакция в течение всего времени. В соответствии с перечисленными выше условиями более полного протекания СВС и была создана установка для проведения СВС в порошке кремния.

Установка для сжигания порошка кремния (рис. 4.14) представляет собой металлический корпус с камерой для сжигания, оснащенный системой откачки воздуха из камеры, автоматической панелью для управления системой откачки воздуха и для регулирования давления внутри

камеры, электронным индикатором давления, блоком управления шаговым двигателем, штуцером для возможности подачи газов в камеру. Все элементы находятся внутри установки. Внутри камеры находится подставка для подложки с подвижным поджигающим электродом и вольфрамовой нитью.

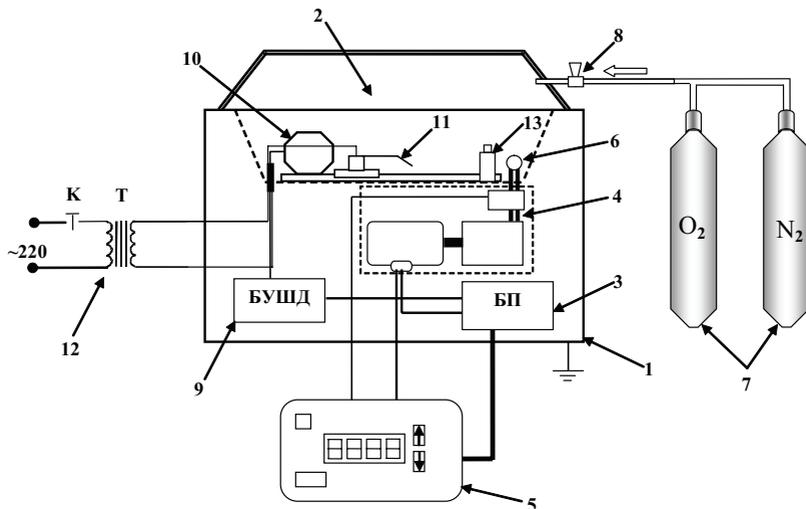


Рис. 4.14. Принципиальная схема камеры для сжигания порошка кремния:

- 1 – корпус установки; 2 – рабочая камера; 3 – блок питания установки;
- 4 – система откачки воздуха из камеры; 5 – панель управления с индикатором давления;
- 6 – клапан для откачки воздуха из камеры; 7 – баллоны с газами;
- 8 – вентиль для подачи газа в камеру; 9 – блок управления шаговым двигателем;
- 10 – шаговый двигатель; 11 – поджигающий электрод на подвижной подставке;
- 12 – высоковольтный трансформатор для поджига;
- 13 – крепеж для вольфрамовой нити.

Питание всех элементов установки, кроме высоковольтного трансформатора, осуществляется от одного блока питания, который в свою очередь питается от сети  $\sim 220$  В 50 Гц.

Камера представляет собой емкость с герметично закрывающейся крышкой, верхняя часть которой выполнена из оргстекла, что позволяет наблюдать процесс горения. Воздух из камеры откачивается системой откачки воздуха, которая представляет собой форвакуумный насос и клапан, который автоматически закрывается при достижении заданного давления внутри камеры. Необходимое давление внутри камеры задается на панели управления, расположенной на передней стенке установки.

Панель управления позволяет в автоматическом режиме управлять откачкой воздуха из камеры до заданного давления. По достижении заданного давления она автоматически отключает насос и закрывает клапан откачки воздуха. На панели расположен цифровой индикатор давления внутри камеры, на котором при помощи кнопок, расположенных справа от него, также устанавливается необходимое давление внутри камеры. Кнопка включения всей установки тоже расположена на панели. Имеется также возможность предварительного программирования шести значений давления. Откачка воздуха из камеры до минимально возможного давления осуществляется в течение 30 секунд. Система откачки воздуха позволяет откачивать воздух из камеры до давления 6 mBar. Герметичность камеры позволяет сохранять необходимое давление долгое время, достаточное для проведения экспериментов. В крышке камеры установлен вентиль со штуцером, через который в камеру подается необходимый для эксперимента газ. Внутри камеры находится подставка для подложки с напыленным порошком кремния. Подставка представляет собой заземленный столик с расположенными на нем подвижным поджигающим электродом и диэлектрическими крепежами для вольфрамовой нити. Поджигающий электрод закреплен на подвижной подставке, которая приводится в движение с помощью шагового двигателя. Электрод подключен к высоковольтному трансформатору, благодаря которому между электродом и подложкой возникает дуговой разряд, необходимый для инициирования СВС. Температура в точке возникновения разряда достаточна для возникновения СВС. Необходимость в управляемом подвижном поджигающем электроде возникла в результате ряда случаев, когда СВС не возникал в точке поджига. При использовании управляемого подвижного электрода имеется возможность передвинуть электрод в другую точку образца для поджига без необходимости открывания камеры и нарушения среды внутри нее. Вольфрамовая нить необходима в тех случаях, когда поджиг образца происходит при низких давлениях. В случае поджига при низких давлениях электродом на нем возникает поверхностный разряд, вместо необходимого для инициирования СВС дугового. Нить крепится на специальные диэлектрические крепежи и подключается к источнику питания. После помещения подложки на подставку вольфрамовая нить опускается в массу напыленного кремния и затем, после создания внутри камеры необходимой среды, накаляется от источника питания. Стационарной нити для инициирования СВС достаточно потому, что при ее накаливании поджиг порошка идет по всему поперечному сечению подложки.

#### 4.5. Синтез оксид-нитридных керамических материалов из низкоплотного порошка кремния

В зависимости от условий экспериментов инициирование СВС в порошке кремния производилось с помощью дугового разряда или путем поджига накаливаемой вольфрамовой нитью.

После поджига в ультрадисперсном порошке кремния формируется зона предварительного нагрева, которая определяет характер распространения волны горения (автоколебательный режим горения) [150, 151]. Температура горения в объеме ультрадисперсного порошка изменяется периодически, в результате чего наблюдается характерный «скачкообразный» автоколебательный режим послынного сгорания кремния. Теплота, выделяющаяся в зоне реакции, переносится в зону предварительного нагрева, что обеспечивает высокую скорость процесса. Если диффузия вещества протекает медленнее термодиффузии, то в зоне реакции выделяется больше избыточной энергии, чем в стационарной волне горения [152].

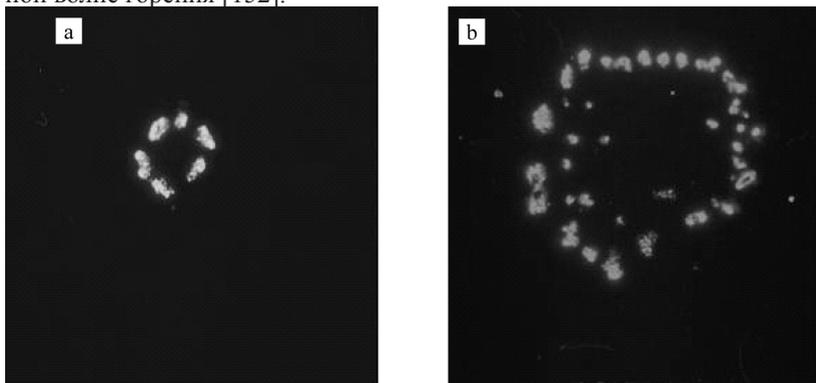


Рис. 4.15. Горение ультрадисперсного порошка кремния в воздухе (увеличение 1.5 раз): а) время горения 5 с., б) время горения 60 с/

В результате исследования установлено, что сверхнизкоплотный порошок кремния горит как в автоколебательном режиме, так и в спиновом. Режим спинового горения характеризуется наличием большого количества фронтов горения внутри и по поверхности образца. На рис. 4.15 а видно, что после формирования СВС возникают высокотемпературные локальные области волн горения в виде ярко светящихся пятен, которые перемещаются по образцу. Вследствие неоднородных тепловых потерь фронт волны горения значительно искажается (рис. 4.15 б).

С повышением плотности смеси скорость распространения волны горения замедляется и уменьшается относительная доля тепловых потерь с поверхности, а фронт волны горения становится плоским. Возрастает время существования высокотемпературной области за волной горения, что обеспечивает большую степень превращения исходного кремния.

При сгорании порошка кремния в воздухе образуются структурированные, слоистые продукты  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и остатки не сгоревшего кремния. С увеличением давления скорость фронта горения растет практически линейно (рис. 4.16). Из-за большого количества волн горения и сложного их перемещения скорость протекания СВС-процесса оценивали по массе прореагировавшего кремния в секунду мг/с. При увеличении давления с 1 до 6 атм скорость горения увеличивается с 0,5 до 2,7 мг/с, что связано с увеличением концентрации воздуха в порах системы и за счет увеличения массы окислившегося кремния развивается более высокая температура, способствующая ускорению протекания химических реакций. Масса полученных соединений возрастает. В зависимости от давления возникают условия для большего соединения молекул  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  с молекулами  $\text{Si}$ .

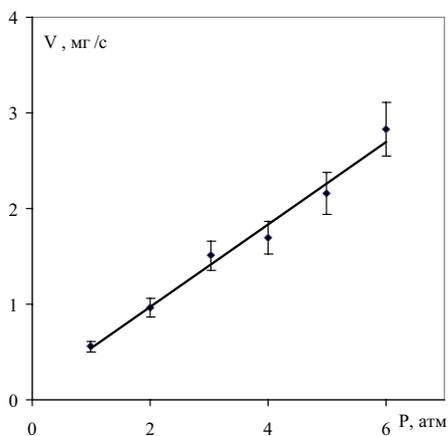
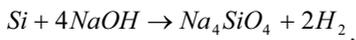
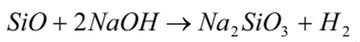
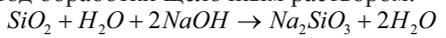


Рис. 4.16. Зависимость скорости горения кремния от давления.

С увеличением давления от 1 до 6 атм привес образца увеличивается с 47 до 68 %. Максимальный прирост массы нитрида кремния при давлении 6 атм. составляет почти 70%, что соответствует увеличению массы образца в 1,7 раза.

Для количественного определения нитрида кремния использовался химический метод обработки щелочным раствором:



Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) с щелочью при температурах, близких к нормальным, не взаимодействует и выпадает в осадок серого цвета. Рентгено-структурный анализ показывает, что полученное вещество является крупнокристаллическим нитридом кремния  $\beta$ -структуры.

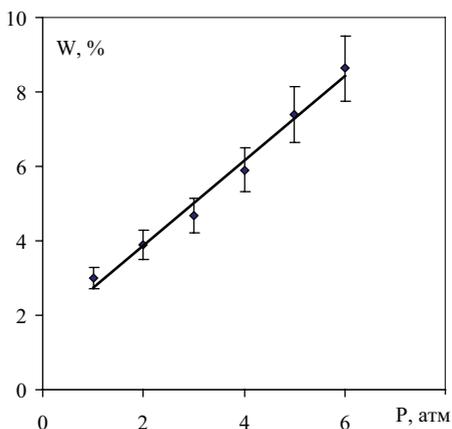
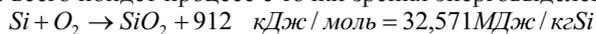


Рис. 4.17. Зависимость выхода нитрида кремния от давления.

На рис. 4.17 видно, что с увеличением давления линейно возрастает процентное содержание нитрида кремния  $W$  к исходному образцу в продукте реакции. Минимальное содержание нитрида кремния составляет 3,1% при давлении 1 атм. При давлении 6 атм процентное содержание увеличивается до 8,5%, что объясняется увеличением концентрации реагирующих компонент в поровом пространстве между частицами кремния. При прохождении волны СВЧ большая масса вещества успевает химически прореагировать с выделением энергии. В волне СВЧ развивается высокая температура, которая увеличивает скорость протекания химических реакций.

Исходное вещество реагирует по нескольким каналам реакций, но преимуществом обладает та реакция, которая имеет наименьшую энер-

гию активации: начинается при более низких температурах, сопровождается большим энерговыделением и имеет более крутую зависимость скорости реакции от температуры. Если конечный продукт какого-либо канала реакций получается в результате нескольких промежуточных, то преимуществом обладает канал с наименьшим числом промежуточных реакций и с наибольшей скоростью протекания каждой реакции. Для получения  $Si_3N_4$  требуется атомарный азот, концентрация которого в СВС возрастает пропорционально температуре. Кроме того, СВС – это быстро протекающий процесс и потому медленно протекающие реакции не успевают завершиться. Поэтому более высокая температура, возникающая при сжигании кремния при повышенных давлениях, приводит к медленному охлаждению системы и способствует полному протеканию медленных реакций с образованием  $Si_3N_4$ . На основе анализа энтальпии образования конечных продуктов делается оценка по какому из каналов вероятнее всего пойдет процесс с точки зрения энерговыделения:



Из реакций следует, что наиболее благоприятно реакция идет по каналу образования  $SiO_2$ , затем  $Si_3N_4$  и наиболее слабо образуется  $SiO$ .

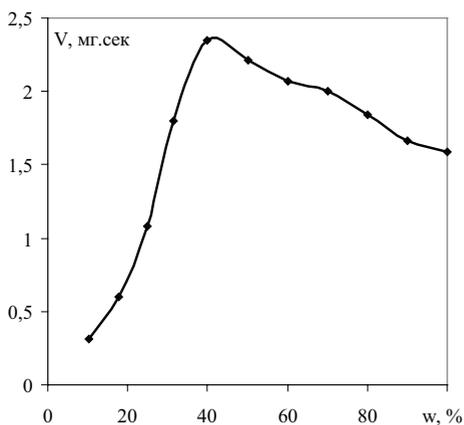


Рис. 4.18. Зависимость скорости горения кремния от содержания кислорода в смеси.

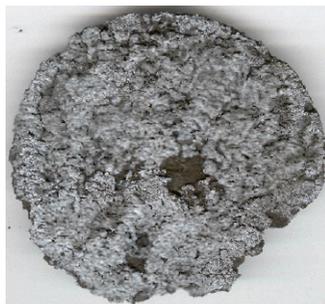


Рис. 4.19. Реакционно-связанная нитрид-оксидная керамика. X 1.

Скорость горения кремния зависит как от давления реагирующего воздуха, так и от процентного содержания кислорода в нем (рис. 4.18). С увеличением содержания кислорода в смеси до 50% скорость горения вырастает в 7 раз (с 0,34 до 2,4 мг/с). Это связано, во-первых, с увеличением концентрации окислителя в порах системы, во-вторых, с ростом температуры за счет увеличения массы окислившегося кремния, способствующей еще большему ускорению протекания химических реакций. Уменьшение скорости горения при концентрации кислорода свыше 50% объясняется тем, что реакция протекает быстрее по поверхности, оплаывая частицы кремния, пористость образца уменьшается и затрудняется доступ окислителя внутрь системы.

В результате сжигания кремния образуется пористая реакционно-связанная нитрид-оксидная керамика (рис. 4.19). Полученный продукт может быть использован в качестве фильтров, работающих в агрессивных условиях и высоких температурах [160].

Таким образом, в результате исследований разработан оригинальный способ создания сверхнизкоплотной структуры порошка кремния, включающий в себя создание взвесей мелкодисперсного порошка кремния и электростатическое осаждение его на подложку. Низкоплотные структуры порошка кремния позволяют реализовать самораспространяющийся высокотемпературный синтез в системе кремний – кислород – азот при нормальных условиях. Варьирование концентрации кислорода позволяет управлять кинетикой процесса СВС, полнотой протекания химических реакций и спеканием полученных продуктов.

## **5. ЭЛЕКТРООЧИСТКА ГАЗОВ В ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА**

### **5.1. Физические основы электрической очистки газа в коронном разряде**

Наибольшее промышленное применение коронный разряд получил в системах электрофильтрации и сепарации различных веществ. Первую промышленную установку для электростатической очистки газов испытал в Калифорнии в 1907 г. доктор Ф.Г. Котрелл [1, 2]. В этой установке пары серной кислоты осаждались с использованием отрицательного коронного разряда. Для получения высокого напряжения применялся механический синхронный выпрямитель.

С момента запуска первого электрофильтра техника электрофильтрации прошла большой путь развития. Были исследованы возможно-

сти использования различных коронных разрядов. Большое влияние на конструкции промышленных электрофильтров оказывало развитие техники высоких напряжений. Создание экономичных управляемых высоковольтных выпрямителей и коммутаторов позволило перейти от коронных разрядов на постоянном токе к использованию в промышленных масштабах импульсных систем питания. Эффективное автоматическое управление высоковольтными источниками позволяет проводить электрофильтрацию в наиболее выгодных режимах. Но по-прежнему в основе действия всех электрофильтров лежат три основных процесса – зарядка частиц, перенос частиц к осадительному электроду и осаждение частиц на некоронирующем электроде [2, 46, 82, 95].

Механизм зарядки частиц изучался многими авторами [3, 74–76, 95]. В электрическом поле с униполярным объемным зарядом частицы приобретают избыточный заряд. Носителями заряда в коронном разряде являются ионы, которые движутся под действием электрического поля к осадительному электроду. При столкновении с частицами ионы оседают на них. Благодаря этому частицы приобретают избыточный заряд той полярности, которую имеет коронирующий электрод. Поток ионов к частице определяется силой внешнего электрического поля и поля поляризации частицы. Препятствующей силой является сила отталкивания между ионами, осевшими на частицу, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Зарядка частицы происходит до тех пор, пока к ней присоединяются ионы. При увеличении числа ионов, осевших на частице, возрастает напряженность поля, созданная заряжающейся частицей. Она направлена навстречу основному полю. В результате уменьшается скорость движения ионов к частице и уменьшается скорость ее зарядки. При равенстве напряженности поля частицы и внешнего поля зарядка прекращается. Величина заряда частиц зависит от ее геометрических размеров, проводимости, а также от концентрации частиц. Предельный заряд проводящей изолированной сферы радиуса  $a$  в поле короны напряженностью  $E_k$  в работах [74–76] определяется следующим образом:

$$q = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_k. \quad (5.1)$$

Выражение, определяющее кинетику зарядки проводящей сферы в поле коронного разряда выведено М.Потенье:

$$q(t) = 12\pi\epsilon_0 E_k a^2 \frac{\pi n k t}{4\pi\epsilon_0 + \pi n k t}, \quad (5.2)$$

где  $a$  – радиус частицы, м;  $e$  – заряд иона, Кл;  $n$  – концентрация ионов во внешней зоне коронного разряда, ион/м<sup>3</sup>;  $k$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/(В·с);  $t$  – время зарядки, с. В действительности реальные частицы отличаются от сферической формы, что усложняет расчеты. Вопросу учета формы частиц посвящено значительное количество работ [70, 76, 77].

Движение частиц к осадительному электроду осуществляется в электрофилт্রে под действием сил электрического поля. На заряженную частицу действует кулоновская сила

$$F_k = Eq. \quad (5.3)$$

При движении под действием этой силы в газовой среде частица испытывает сопротивление. Определение силы сопротивления среды в различных условиях составляет одну из основных задач при расчете скорости движения частиц. Расчет скорости движения частиц зависит от числа Рейнольдса, которое равно:

$$Re = vl / \nu, \quad (5.4)$$

где  $v$  – скорость движения частицы относительно среды;  $l$  – характерный размер частицы;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды. При малых значениях числа Рейнольдса ( $Re < 0,5$ ) сила сопротивления среды движению сферических частиц выражается формулой Стокса:

$$F_c = -6\pi\mu a v. \quad (5.5)$$

В работе [77] скорость установившегося движения в стоксовском приближении определяется из условия равенства электрической силы и силы сопротивления среды с учетом поправки Кенингема на свойства поверхности частицы:

$$v = \frac{Eq \left( 1 + A_k \frac{l_m}{a} \right)}{6\pi\mu a}, \quad (5.6)$$

где  $A_k$  – коэффициент, зависящий от свойств поверхности частицы;  $l_m$  – эквивалентная длина свободного пробега молекул газа.

Для крупных частиц скорость движения пропорциональна размеру частиц и квадрату напряженности поля.

Расчет неустановившегося движения частиц значительно усложняется из-за нелинейного характера силы сопротивления среды [77, 103-105].

В электрическом поле коронного разряда возникает дополнительная сила, действующая на частицы. Это явление получило название

электрического ветра. Электрический ветер возникает при соударении ионов с молекулами газа. В результате молекулы газа получают дополнительный импульс, и скорость движения частиц к осадительному электроду увеличивается [69, 70, 78–83, 103–106].

Осаждение заряженных частиц на электроде является сложным процессом, который зависит от технологических параметров и от свойств осаждаемой пыли. На осаждение пыли большое влияние оказывают электропроводность и размеры частиц, форма частиц, скорость частиц и скорость газа в электрофильтре, температура, влажность, химический состав и другие факторы. Также на осаждение частиц оказывают влияние форма электродов и состояние их поверхности.

Начиная с первого промышленного электрофильтра Котрелла [1, 2] в промышленных установках применялся коронный разряд постоянного тока отрицательной полярности [3]. Повышение требований к степени очистки газов поставило вопрос о подборе формы питающего тока для конкретных свойств улавливаемой пыли. Наиболее перспективными в это отношении оказались электрофильтры, работающие при импульсной зарядке коронирующих электродов [77]. Промышленные испытания показали преимущества импульсной системы питания по степени очистки и по потребляемой мощности. Было установлено, что при импульсном питании пробивное напряжение в системе электродов острие–плоскость и в коаксиальной системе увеличивается по сравнению с постоянным напряжением при отрицательном коронном разряде [3]. Поскольку зарядка частиц и их перенос к осадительному электроду более эффективно происходят при повышенных напряжениях, импульсные источники получили широкое распространение. В настоящее время по длительности используемых импульсов источники питания коронных разрядов можно разделить на три большие группы.

**Миллисекундные импульсы.** Длительность таких импульсов изменяется от нескольких миллисекунд в случае одиночных импульсов до сотен миллисекунд для пакетов импульсов. В таких схемах регулирование напряжения на электрофильтре осуществляется за счет изменения угла открывания управляющего тиристора в первичной обмотке высоковольтного трансформатора [3]. Схемы, реализующие миллисекундные импульсы, имеют еще одно название – источники черезпериодного питания. Это означает, что не все полупериоды выпрямленного напряжения поступают в обмотку высоковольтного трансформатора. Некоторое количество импульсов исключается, в результате чего напряжение на электрофильтре приобретает импульсно-периодический характер.

По литературным данным энергозатраты при таком питании электрофильтров уменьшаются в  $2 \div 10$  раз.

Поскольку электрофильтр обладает электрической емкостью, а высоковольтный выпрямитель имеет емкостной фильтр для сглаживания пульсаций напряжения, напряжение на электрофильтре представляет сумму постоянного напряжения и напряжения пульсаций. Следовательно, ток через такой электрофильтр протекает постоянно. Питание электрофильтров в таком режиме широко используется в промышленных масштабах.

**Микросекундные импульсы.** Длительность микросекундных импульсов лежит обычно в интервале от 10 – 20 мкс до нескольких сотен микросекунд. Известные системы питания электрофильтров такого типа представляют собой два источника питания, работающих на один электрофильтр [3]. Один из них создает постоянное напряжение, близкое к предпробойному, а второй создает импульсное напряжение. Поскольку промышленный электрофильтр обладает значительной электрической емкостью, создание микросекундных импульсов с высокой скоростью нарастания становится сложной технической задачей. Системы импульсного питания имеют большую сложность и, соответственно, более высокую стоимость. По литературным данным повышение эффективности очистки газов, уменьшение энергопотребления делают применение импульсных систем питания целесообразным.

**Наносекундные импульсы.** При импульсном питании резкое нарастание импульса и малая его длительность являются наиболее важными факторами. Если скорость нарастания импульса равна или выше средней скорости распространения электронной лавины, то электрическое поле может проникать внутрь чехла коронного разряда в процессе образования лавины. При этом поле ускоряет электроны внутри чехла коронного разряда и образует сгустки ионов большой плотности. Таким образом, в случае нестационарного коронного разряда составляющая напряженности, зависящая от времени, будет играть определяющую роль. Эти условия в наибольшей степени осуществляются в системах питания с наносекундными импульсами [161].

Формирование наносекундных импульсов осуществляется с помощью высоковольтных разрядников. Согласно литературным данным преимуществом наносекундного импульса является более высокое пробивное напряжение, чем у микросекундного. Это позволяет поднимать постоянную составляющую почти до предпробойного уровня. Напряжение на электрофильтре представляет собой сумму постоянного

и импульсного напряжений. Реализация наносекундных импульсов на промышленном электрофилт্রে является сложной технической задачей. Наиболее распространенное техническое решение – это коммутация заряженного конденсатора через высоковольтный разрядник. При определении энергетической эффективности электрофильтров такого типа необходимо учитывать потери на электромагнитное излучение. Недостатком импульсных схем питания электрофильтров является усложнение источника питания, поскольку создание надежно работающих высоковольтных генераторов импульсов намного сложнее обычного высоковольтного выпрямителя. В настоящее время применяются различные схемы импульсного питания, которые генерируют импульсы длительностью от десятков миллисекунд до сотен наносекунд [3].

## **5.2. Особенности электроочистки газа в малых разрядных промежутках**

Охрана окружающей среды от загрязнений промышленными выбросами – одна из важных проблем современности. Начиная с 70-х годов в Советском Союзе практически ежегодно принимались постановления об усилении мер по охране природы, но экологическая ситуация в стране не изменялась к лучшему. Ускоренные темпы развития промышленности и транспорта привели к увеличению загрязнения атмосферного воздуха. В выбросах тепловых электростанций, работающих на угле, содержится очень большое количество золы. Так, для блока 300 МВт оно составляет 30 т/ч. Поэтому в энергетике большое внимание уделяется разработке газоочистных устройств для очистки больших объемов газов. Наиболее подходящими для этой цели являются электрофильтры, которые обладают малым гидравлическим сопротивлением, требуют небольших энергетических затрат, могут обеспечить необходимую высокую степень очистки дымовых газов от пыли [46, 48].

С начала XX века и до настоящего времени электрофильтры прошли длительный путь совершенствования конструкции и повышения эффективности очистки газов от золы. Эти усовершенствования коснулись практически всех узлов электрофильтров. За время разработки нескольких поколений электрофильтров в определенной степени реализовано большинство возможных резервов.

Необходимость создания электрофильтров нового поколения определяется новыми задачами по защите атмосферы от загрязнения промышленными выбросами:

- ужесточением требований к содержанию пыли в газах после очистки;
- резким увеличением объемов газов, нуждающихся в газоочистке;
- расширением номенклатуры пылей, от которых необходимо очищать воздух.

Допустимая весовая концентрация частиц в дымовом газе после очистки уменьшена с 100–150 мг /м<sup>3</sup> до 50 мг/м<sup>3</sup>, и в ближайшем будущем неизбежен переход на общеевропейские нормы – 20 мг/м<sup>3</sup>. Увеличение объемов дымовых газов может быть проиллюстрировано примером сооружения сверхмощных тепловых электростанций. Расширение номенклатуры пылей связано с вовлечением в производство новых веществ.

Разработка и создание газоочистного оборудования, отличающегося высокой степенью очистки и уменьшенными массогабаритными показателями, в настоящее время осуществляется по пути совершенствования систем коронирующих электродов, использования увеличенного межэлектродного расстояния в электрофильтрах, разработки новых систем регулирования напряжения, использования источника релаксационного питания; применения комбинированной системы электрогазоочистки [43, 162–166].

Подобный подход к решению задачи интенсификации электрогазоочистки несколько увеличивает степень очистки отходящих газов, но практически не решает вопрос о больших габаритах электрофильтров. Применение импульсных систем питания электрофильтра в условиях больших разрядных промежутков требует дорогостоящего высоковольтного оборудования.

Анализ конструкций классических электрофильтров позволяет выявить следующие недостатки:

- Большие габариты. Например, электрофильтр УГЗ – 4 – 265, применяемый в теплоэнергетике, имеет следующие габариты: длина, в направлении которой движется фильтруемый газ – 24,8 м, высота 21,8 м, ширина (по осям крайних опор) – 27 м. Общая площадь осадительных электродов составляет 36900 м<sup>2</sup>.
- Большая масса и стоимость, связанная с тем, что электрофильтры изготавливаются исключительно из стали и потому это достаточно дорогостоящие сооружения.
- Степень улавливания пыли в реально применяемых в промышленности электрофильтрах достигает обычно 96 – 98% и только в некоторых случаях выше.

- Самая экологически вредная мелкодисперсная фракция пыли, считается самой трудноуловимой. Это те самые 2 – 4 % пыли.
- Из-за того что капитальные затраты на создание классических электрофильтров весьма велики, электрофильтры с расходом газа менее нескольких десятков тысяч м<sup>3</sup>/час ставить экономически не целесообразно.
- В классических электрофильтрах используются высоковольтные (60 – 80 кВ, а в некоторых случаях более 100 кВ) источники питания постоянного тока, что влечет за собой усложнение конструкции фильтра.
- В классическом электрофильтре наблюдается существенное ухудшение электроочистки при работе с диэлектрическими пылями.

В настоящее время актуальным является проведение исследований механизмов электростатического извлечения дисперсной фазы из газового потока в поле коронного разряда. Поэтому в данной работе исследуются процессы электрофильтрации запыленного газа в разрядных промежутках коаксиальной геометрии. Для решения поставленной задачи необходимо:

- Создать ряд электрофильтров разного диаметра.
- Разработать методику определения степени улавливания пыли в зависимости от длины электрофильтра.
- Провести исследования параметров очистки газа от пыли при различных режимах работы установки.
- Сравнить полученные экспериментальные результаты с теоретическими расчетами, проведенными в рамках классического представления о процессе электроочистки газа в коронном разряде.

**Экспериментальная установка.** Исследования характеристик электрофильтрации воздуха проводились на экспериментальной установке (рис. 5.1). С помощью вентилятора высокого давления 1 в воздухопроводе 2 устанавливается требуемая скорость протока воздуха, которая регистрируется анемометром 3. С помощью электронагревателя 4 устанавливается требуемая температура в диапазоне 20 – 250<sup>0</sup>С, регистрируемая термометром 5. Компрессором 6 воздух через ротаметр 7 подается в пылегенератор 8 и далее по пылепроводу 9. Взвешенная в воздухе пыль вводится в воздухопровод, где смешивается с нагретым воздухом. В качестве пыли используется угольная зола ТЭЦ г. Бишкек. Запыленный подогретый воздух, моделирующий дымовые газы, проходит через электрофильтр, на котором осаждаются зольные частицы, а воздух выбрасывается в окружающую среду. В электрофильтре корони-

рующий электрод 10 из нихромового провода диаметром 0,2 мм натянут по оси цилиндрического осадительного электрода 11. Использовались коаксиальные конструкции электрофильтров длиной 220 мм с диаметрами осадительных электродов 36 мм, 51 мм и 57,5 мм.

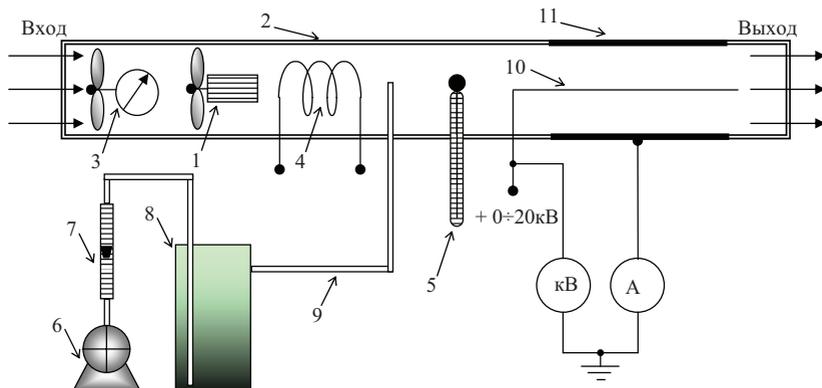


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор высокого давления, 2 – воздухопровод, 3 – анемометр, 4 – нагреватель воздуха, 5 – термометр, 6 – компрессор, 7 – ротаметр, 8 – пылегенератор, 9 – пылепровод, 10 – коронирующий электрод, 11 – осадительный электрод.

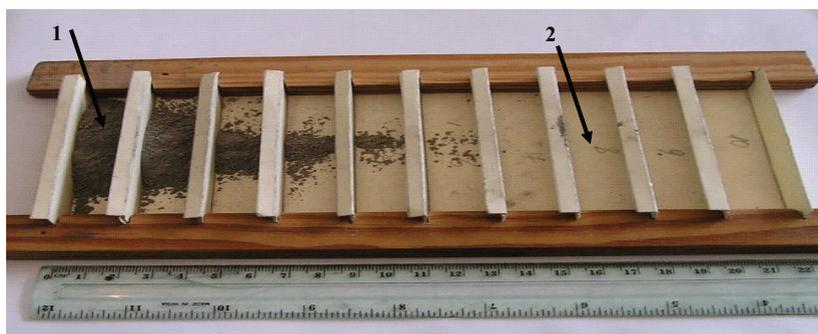


Рис. 5.2. Внешний вид распределения пыли по лоткам: 1 – пыль, 2 – лотки.

Путем регистрации напряжения на разрядном контуре, силы электрического тока разряда, объемного расхода воздуха через электрофильтр, входящей и выходящей запыленности воздуха можно определить характеристики процесса электрофильтрации газа. Главными показателями работы электрофильтра являются степень улавливания пыли  $\eta$  (%) и удельные энергозатраты на очистку газа  $W$  (кВт $\times$ ч/1000 м<sup>3</sup>).

Запыленность воздуха изменялась в интервале  $8 - 30 \text{ г/м}^3$ . Ее величина определялась по разнице массы пыли в пылегенераторе до и после эксперимента при известном расходе воздуха через установку.

Для исследования распределения массы осевшей пыли  $m$  (в % к полной массе осажденной пыли) по длине электрофильтра вдоль цилиндрического осадительного электрода, по всей длине, прорезана щель шириной 4 мм, которая в период эксперимента закрывалась извне. После проведения каждого эксперимента через данную щель пыль осторожно ссыпается в специальные лотки и определяется распределение пыли по длине электрода. Лотки разбивают всю длину осадительного электрода на 10 равных частей. Заполненные пылью лотки (рис. 5.2) взвешиваются, по разности масс наполненного пылью и пустого лотка определяется масса пыли, выпавшей на определенной длине осадительного электрода.

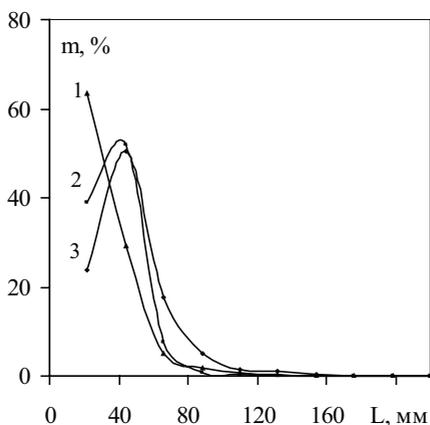


Рис. 5.3. Распределение массы пыли  $m$  по длине  $L$  электрофильтра для диаметров осадительного электрода: 1–36 мм, 2–51 мм, 3–57,5 мм.

Из зависимостей распределения массы уловленной пыли (рис. 5.3) в % по длине электрофильтра для различных диаметров осадительного электрода следует, что при больших диаметрах электрофильтра 51 мм или 57,5 мм максимум выпадающей пыли приходится на второй лоток, а при малом диаметре максимум смещается на первый лоток, причем в первом лотке оказывается свыше 60% уловленной пыли. Это объясняется тем, что при больших диаметрах электродов пылинки дольше достигают осадительного электрода, и поэтому максимум приходится на второй лоток. При малых диаметрах пылинки оседают очень быстро,

поэтому максимум приходится на первый лоток. В целом уменьшение диаметра способствует выпадению пыли практически до 100%-го улавливания на более коротких длинах. На рис. 5.4 показана зависимость степени улавливания пыли  $\eta$  от длины электрофильтра. Видно, что уменьшение диаметров способствует существенному увеличению степени улавливания на одинаковом расстоянии от входа в электрофильтр. Граница 100%-го улавливания для максимального диаметра осадительного электрода находится на расстоянии 198 мм, для среднего – 154 мм, а для минимального диаметра – на расстоянии 132 мм. Причем если для диаметров 57,5 мм и 51 мм эти границы достигаются при напряжении на разрядном контуре 13 кВ, то для диаметра 36 мм при 10,5 кВ. Т.е. на малых диаметрах реализуется более высокая степень улавливания.

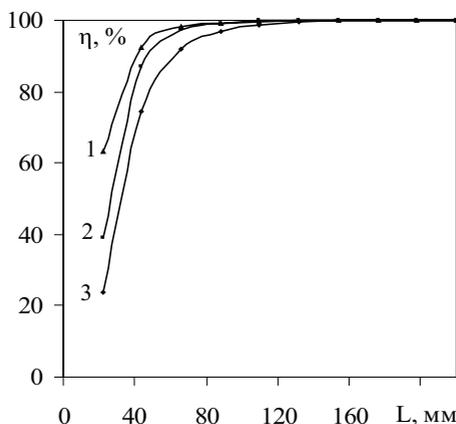


Рис. 5.4. Зависимость степени улавливания пыли  $\eta$  по длине  $L$  электрофильтра для диаметров осадительного электрода: 1–36 мм при 10,5 кВ, 2–51 мм при 13 кВ, 3–57,5 мм при 13 кВ.

На рис. 5.5 показаны зависимости приведенных энергозатрат (энергозатраты, вкладываемые на длине 100%-го улавливания пыли) от прикладываемого напряжения к электрофильтрам разного диаметра и границы максимальных 4 и минимальных 5 энергозатрат на электроочистку газов, принятых в промышленности. Из результатов следует, что энергозатраты находятся вблизи нижней границы принятых в промышленности энергозатрат, т.е. электроочистка в экспериментальных электрофильтрах происходит весьма экономично. Из (рис. 5.5) также видно, что энергозатраты как для больших диаметров, так и для малого диаметра

возрастают с увеличением напряжения. Однако от диаметра электрофильтра они практически не зависят.

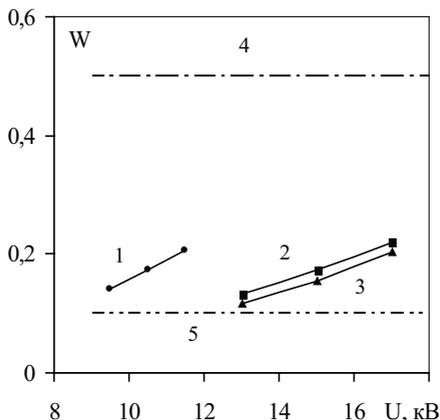


Рис. 5.5. Зависимость удельных энергозатрат  $W$ , кВт×ч/1000м<sup>3</sup> от напряжения для диаметров осадительного электрода: 1–36 мм, 2–51 мм, 3–57,5 мм и 4, 5-промышленные энергозатраты (верхний нижний предел).

Для расчета степени очистки газа в электрофильтре используется уравнение Дейча [167] для цилиндрического электрофильтра:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{\omega 2L}{Rv}}, \quad (5.7)$$

где:  $R$  – радиус трубчатого осадительного электрода;  $\omega$  – скорость движения заряженных частиц к поверхности трубы (скорость дрейфа);  $L$  – длина трубы;  $v$  – скорость газового потока.

Скорость дрейфа частиц определяется из уравнения [117]:

$$\omega = \frac{0,0118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2}{\mu_g} r, \quad (5.8)$$

в котором:  $E$  – средняя напряженность электрического поля;  $r$  – радиус частиц;  $\mu_g$  – вязкость воздуха.

Как показывает практика, скорости дрейфа частиц в электрическом поле электрофильтра примерно в два раза меньше рассчитанных. Поэтому при расчете скорости дрейфа для каждого размера частиц полученные значения уменьшают вдвое [117].

Для расчета напряженности электрического поля используется уравнение [168]:

$$E = \sqrt{2J/2\pi\epsilon_0 k} \quad (5.9)$$

Здесь:  $J$  – ионный ток на единицу длины коронирующего провода;  $k$  – подвижность ионов;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Данное уравнение экспериментально подтверждено измерениями Потенье и Моро-Ано [169] и представляет собой выражение постоянной напряженности поля в области трубки электрофилтра на некотором расстоянии от коронирующего электрода. Оно может быть использовано для примерных расчетов электрофилтров коаксиальной конструкции.

Скорость дрейфа частиц пропорциональна их радиусу, и для расчета необходимо задать дисперсный состав пыли. Ситовый анализ золы ТЭЦ г. Бишкек показал следующее распределение частиц по размерам (табл. 5.1):

Таблица 5.1

Радиус $r$ , мкм	28	25	20	16	10
Содержание $\Phi$ , %	13,3	9,2	25,4	31,1	21

Последовательно рассчитывается степень очистки в % для каждой фракции, а общая степень очистки газов (в %) определяется из соотношения:

$$\eta = (\eta_1\Phi_1 + \eta_2\Phi_2 + \dots + \eta_n\Phi_n)/100.$$

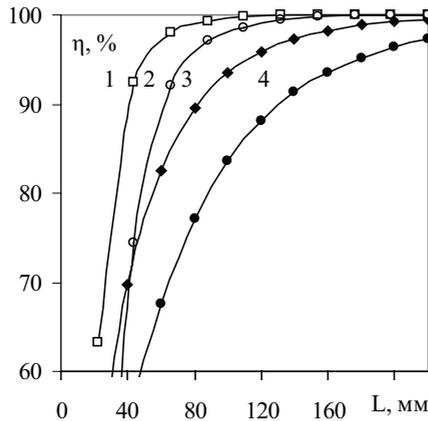


Рис. 5.6. Зависимость степени улавливания от длины электрофилтра.  
1, 3 – эксперимент и расчет для  $d=36$  мм, 2, 4 – эксперимент и расчет для  $d=57,5$  мм.

На рис. 5.6. приведены экспериментальные и расчетные зависимости степени улавливания от длины электрофильтра. Зависимости 1, 3 эксперимент и расчет соответственно для диаметра осадительного электрода 36 мм, а 2, 4 эксперимент и расчет для диаметра 57,5 мм. Все зависимости получены для  $J = 0,00125$  А/м.

Анализ результатов показывает значительное расхождение расчетных и экспериментальных зависимостей степеней очистки газа от пыли в электрофильтрах с малыми разрядными промежутками ( $d=36-57$  мм). Для разрядных промежутков 100 мм и более расчеты достаточно хорошо согласуются с экспериментом [41].

В табл. 5.2. приведены рассчитанные и экспериментально определенные минимальные значения  $L$  осадительного электрода соответствующих  $\eta=100\%$  степени улавливания пыли для экспериментальных электрофильтров диаметром  $d= 36, 51$  и  $57$  мм.

Таблица 5.2

d, мм	L, мм соответствующих $\eta=100\%$	
	Эксперимент	Расчет
36	110	600
51	132	800
57.5	160	1000

Из табл. 5.2 следует, что расчетная длина электрофильтра в 6 раз больше экспериментально определенной не зависимо от диаметра электрофильтра.

Большое разногласие расчета и эксперимента не связано с использованием значений подвижностей ионов в интервале 0,00018-0,00022 м<sup>2</sup>/В·с при расчете напряженности электрического поля.

Еще большие разногласия теории и эксперимента наблюдаются при проведении электрофильтрации пылей субмикронного размера. В экспериментах использовалась пыль монокристаллического кремния с дисперсным составом 0,5 мкм и менее. Для проведения исследования фильтрации субмикронного порошка кремния на промежуточной стадии необходимо иметь воздушный поток, содержащий частицы кремния во взвешенном состоянии. Традиционными методами получить подобные потоки не удается из-за сильной агломерации порошка. Поэтому была разработана методика создания воздушных взвесей мелкодисперсных порошков, подробно рассмотренная в [157]. Расчетные и натурные эксперименты проводились на электрофильтре диаметром 36 и длиной 220 мм. Плотность тока на единицу длины коронирующего электрода составляла 0,00125 А/м.

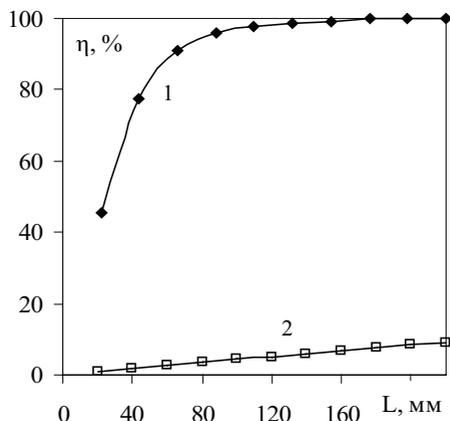


Рис. 5.7. Зависимость степени улавливания порошка кремния от длины электрофильтра: 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Сравнение степени улавливания субмикронного порошка кремния от длины электрофильтра (рис. 5.7) показывает заметное отличие результатов теории и эксперимента. Экспериментально определенная длина осадительного электрода, соответствующая 100% степени улавливания пыли, равна 0,18 м, а рассчитанная по методу Дейча – 18 м. Расхождения в 100 раз нельзя объяснить погрешностью эксперимента.

Таким образом, полученные в работе экспериментальные результаты по улавливанию пыли в электрофильтрах с разрядными промежутками менее 100 мм не могут быть объяснены в рамках моделей Дейча и Дейча–Попкова. В их основе лежат следующие предположения: в начальной стадии пыль распределяется равномерно по сечению электрофильтра, не уловленная пыль продолжает оставаться равномерно распределенной, а скорость дрейфа заряженных частиц является эффективной постоянной величиной. Поэтому величина скорости частиц в направлении осадительного электрода полностью определяет степень улавливания электрофильтра. Скорость дрейфа ограничивается размерами частиц и силами Стокса, с одной стороны, и ограниченными величинами (из-за опасности электрического пробоя газового промежутка электрофильтра) напряженностей электрического поля в разрядном промежутке – с другой. В табл. 5.3 приведены скорости дрейфа частиц в зависимости от их радиуса [117].

Таблица 5.3

$r$ , мкм	2,5	7,5	15	20	40
$\omega$ , м/с	0.031	0.094	0.188	0.25	0.5

Так как  $\eta$  экспоненциально уменьшается с уменьшением скорости дрейфа, то наиболее трудно удаляются пыли, в которых присутствует большое количество частичек микронного и субмикронного размеров.

В случае электрофильтрации газа в малых разрядных промежутках предполагается, что определяющую роль в транспортировке частиц к осадительному электроду играет электрический ветер.

Электрический ветер (ЭВ) возникает во всех случаях зажигания коронного разряда и играет определяющую роль для теплообмена технологических аппаратов, электроочистке газов, в процессах сушки различных материалов [80–83, 118].

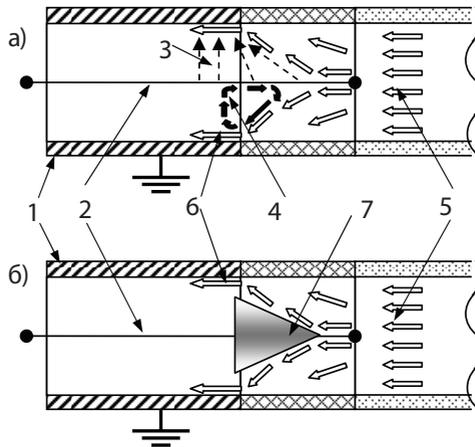


Рис. 5.8. Схема классического (а) и газодинамического (б) электрофильтров: 1 – осадительный электрод, 2 – коронирующий электрод, 3 – электрический ветер, 4 – газодинамическое течение, 5 – пылегазовый поток, 6 – отсесненный пылегазовый поток, 7 – диэлектрический конус.

При переходе к количественно меньшим радиусам (рис. 5.8 а) осадительного электрода 1 (порядка 1,5–3 см вместо 10–15 см как у классических электрофильтров) и использовании тонкого коронирующего провода 2 (диаметром 50 мкм вместо 1–2 мм) определяющий вклад в очистку газа начинает вносить качественно другой механизм процесса осаждения частиц пыли.

Перед входом в цилиндрический электрофильтр вблизи коронирующего электрода за счет ЭВ 3 возникает вихревое газодинамическое течение 4. Поток газа подобно конусу раздвигает набегающий пылевой поток 5 от оси цилиндра ближе к осадительному электроду. В результате этого вблизи стенки осадительного электрода формируется отесненный пылегазовый поток 6. После чего пыль попадает в зону горения коронного разряда, заряжается и осаждается электростатическими силами на короткой длине осадительного электрода.

В классическом электрофильтре из-за больших межэлектродных расстояний замкнутое газодинамическое течение 4, по всей видимости, замыкается далеко от осадительного электрода. Это приводит к незначительному отеснению пылегазового потока к осадительному электроду и потому не вносит определяющего вклада в процессы электрофильтрации пыли.

Для проверки предложенного механизма фильтрации газа в малых разрядных промежутках был изготовлен газодинамический электрофильтр (ГДЭФ) (рис. 5.8 б). Отличие ГДЭФ от обычного цилиндрического электрофильтра состоит в том, что на входе установлен диэлектрический конус 6, который является эквивалентом газодинамического течения. Результаты исследования процесса электрофильтрации газа аналогичны показателям рис. 5.3-5.7, что подтверждает предложенный механизм фильтрации газа в малых разрядных промежутках.

Таким образом, уменьшение межэлектродного расстояния позволяет использовать для электрофильтрации газодинамическое течение, влиянием которого на больших межэлектродных расстояниях у классических электрофильтров можно пренебречь. Уменьшение межэлектродного расстояния сопровождается снижением напряжения, необходимого для горения коронного разряда и достигается 100% улавливание пыли вне зависимости от фракционного состава [170].

Из литературных данных и проведенных исследований следует, что ГДЭФ по сравнению с классическим электрофильтром равной производительности позволяет реализовать следующие преимущества:

1. Сократить длину зоны улавливания пыли от 9,6-24,8 м до порядка 15 см.
2. Уменьшить массу металла, необходимого для создания электрофильтра, и его стоимость в несколько сот раз.
3. Снизить напряжение, необходимое для горения коронного разряда, в (5-10 раз) с 100 кВ до 10-20 кВ.
4. Получить 100 % улавливания пыли вместо 96-98 %, в том числе самой экологически вредной мелкодисперсной фракции.

5. Обеспечить газодинамическими электрофильтрами большие промышленные и малые объекты: малые котельные, автомобили (для фильтрации входящего в них воздуха или выхлопных газов), трубы бытовых печей.
6. Улучшить экологическую обстановку вблизи всех пылящих и коптящих объектов, таких как цементные заводы, металлургические комбинаты, тепловые электростанции.

При всем этом энергозатраты на электроочистку газа в газодинамическом электрофильтре получаются 0,15-0,25 кВт·ч/1000м<sup>3</sup> газа, т. е. на уровне хороших электрофильтров.

Проделанная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Чем меньше диаметр электрофильтра, тем на более короткой длине улавливается 100% пыли.
2. Изменение диаметра электрофильтра в диапазоне от 36 мм до 57,5 мм не влияет на приведенные энергозатраты.
3. Уменьшение прикладываемого напряжения способствует сокращению энергозатрат и одновременно увеличивает длину 100%-го улавливания пыли.
4. Оптимальная длина электрофильтра (100% очистки), например для d=36 мм при U=10,5 кВ, составляет 132 мм.

Предлагаемое устройство позволяет сократить массагабариты примерно в 100 раз при сохранении производительности и величины энергозатрат и одновременно ликвидировать все перечисленные выше недостатки классических электрофильтров.

### **5.3. Дрейф заряженных частиц в газодинамическом электрофильтре**

Экспериментально обнаружено, что электрофильтрация газа в малых разрядных промежутках (менее 6 см) сопровождается включением качественно другого механизма очистки газа по сравнению с обычной электростатикой, которая работает в классических электрофильтрах. Совместно с электростатическим механизмом эффективно начинает работать газодинамический. При этом длина электрофильтра относительно классических электрофильтров сокращается на два порядка, а степень улавливания пыли достигает 99% на длине электрофильтра порядка 7–10 см [170].

Исследования особенностей электрофильтрации газа в малых разрядных промежутках проводились на электрофильтре коаксиальной

конструкции длиной 220 мм и диаметрами осадительного электрода 36, 51 и 57,5 мм. В качестве коронирующего электрода использовался нихромовый провод диаметром 0,2 мм. Напряжение питания в экспериментах составляло 9,5 – 17 кВ. Детальное описание методики экспериментов приведено в работе [170].

Экспериментальные зависимости степени улавливания  $\eta$  от длины  $L$  газодинамического электрофилтра (ГДЭ), показанные на рис. 5.9, существенно отличаются от вычисленных по теории для классических электрофилтров. При этом, чем меньше размер частиц, тем сильнее происходит расхождение между теорией и экспериментом. Для объяснения экспериментальных данных необходимо решить обратную задачу и по экспериментальным данным о степени очистки газа вычислить реальное значение скорости дрейфа заряженных пылевых частиц в ГДЭ.

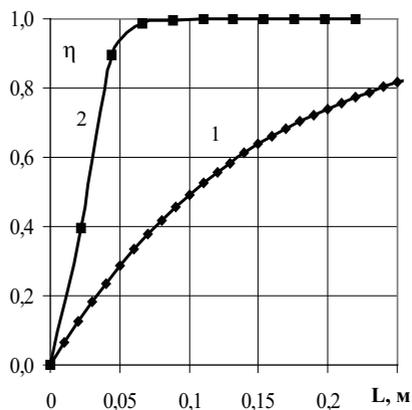


Рис. 5.9. Зависимость степени улавливания  $\eta$  угольной золы ТЭЦ г. Бишкек от длины электрофилтра  $L$ . 1 – классический и 2 – газодинамический электрофилтры.

Для анализа работы ГДЭ воспользуемся уравнением Дейча (5.7), применяемого для расчета степени улавливания пыли  $\eta$  или КПД цилиндрического электрофилтра. Скорость дрейфа частиц определяется из формулы (5.8). Опыт показывает, что реальные скорости дрейфа частиц в электрическом поле электрофилтра примерно вдвое меньше, рассчитанных теоретически. Поэтому при расчете скорости дрейфа для каждого размера частиц вычисленное значение уменьшают вдвое. Для расчета напряженности электрического поля используется формула (5.9).

Первоначально предполагалось, что классическая теория электрофильтрации для ГДЭ не применима. Ведь в ГДЭ за период времени порядка 0,035 – 0,05 с степень очистки газа может достигать 99%, когда газ, двигающийся со скоростью 2 м/с, успевает пройти расстояние всего 7 – 10 см. Предполагалось, что за такое короткое время пылинки еще не успеют приобрести стационарный заряд.

Например, согласно [168] в классическом электрофилт্রে период зарядки частиц до выхода на заряд, равный всего 91% от максимального, достигает 0,2 с при токе 135 мкА/м или 1 с при токе 43 мкА/м коронирующего провода. При этом диаметр осадительного электрода составлял 9,25 см, диаметр коронирующего электрода – 0,8 мм, напряжение – 40 кВ. Значит, увеличение тока в  $n_1 = 135/43 = 3,14$  раза сопровождается сокращением периода зарядки в  $n_1 = 1/0,2 = 5$  раз. Теперь оценим, во сколько раз сокращение периода зарядки превосходит кратность увеличение силы тока.

$$N = n_1 / n_1 = 5 / 3,14 = 1,59 \text{ раза.}$$

В ГДЭ при диаметре осадительного электрода 5,1 см удельные токи достигают 1900 мкА/м, что в  $n_{\text{ГДЭ}} = 1900/135 = 14$  раз больше, чем в классическом электрофилт্রে. Следовательно, следует ожидать сокращение периода зарядки в ГДЭ относительно периода зарядки в классическом электрофилт্রে в  $n = N n_{\text{ГДЭ}} = 1,59 \cdot 14 = 22,26$  раза.

Таким образом, приблизительная оценка периода зарядки частиц пыли в ГДЭ до выхода на 91% от максимально возможного дает значение  $T = 0,2/22,26 = 0,009$  с, что в 4 – 5 раз меньше периода осаждения пыли в ГДЭ до степени очистки равном 99%. Значит, периодом зарядки частиц до выхода на стационарный уровень заряда можно пренебречь и использовать классическую теорию электрофильтрации.

При анализе уравнения (5.7) можно сделать вывод, что единственной переменной величиной, которая должна отличаться от такой же переменной величины у классического электрофилттра и может повлиять на скорость осаждения пыли в ГДЭ должна быть скорость дрейфа заряженных частиц к поверхности трубы  $\omega$ . Поэтому введем понятие «газодинамическая скорость дрейфа»

$$\omega^* = G\omega, \quad (5.10)$$

где  $G$  – газодинамический коэффициент скорости дрейфа.

Обычную скорость дрейфа заряженных частиц  $\omega$ , которая до сих пор применялась для описания движения заряженных частиц в классических электрофилттрах, для отличия от газодинамической скорости дрейфа  $\omega^*$  будем называть «электростатической скоростью дрейфа».

После подстановки газодинамической скорости дрейфа  $\omega^*$  по уравнению (5.10) в уравнение Дейча (5.7) методом последовательных приближений выбирается такая величина коэффициента  $G$ , при которой вычисленное значение степени улавливания  $\eta_{\text{выч}}$  на данной длине электрофильтра  $L$  совпадет с экспериментально зарегистрированным значением  $\eta_{\text{эксп}}$ .

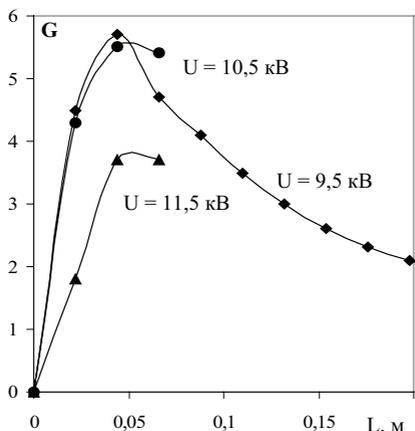


Рис. 5.10. Зависимость газодинамического коэффициента скорости дрейфа  $G$  от длины электрофильтра  $L$  и напряжения  $U$ .

Обработка экспериментальных данных показала, что газодинамический коэффициент скорости дрейфа  $G$  является величиной переменной. Он зависит от расстояния от входа в электрофильтр  $L$  и прикладываемого напряжения  $U$  (рис. 5.10). В качестве примера на этом рисунке рассмотрен электрофильтр с диаметром 36 мм. Для диаметров электрофильтров 51 и 57,5 мм, на которых проводились эксперименты, получаются аналогичные зависимости.

Увеличение коэффициента  $G$  по длине электрофильтра  $L$  можно объяснить тем, что на входе в электрофильтр под действием электрического ветра формируется тороидальный газодинамический вихрь, который постепенно, по мере продвижения пыли внутрь фильтра, разгоняет эту пыль до некоторой скорости. Например, при 9,5 кВ, когда коронный разряд только возникает и сила тока еще относительно слаба (750 мкА/м), на всей длине газодинамического электрофильтра длиной 0,22 м происходит улавливания пыли только на 94%. В этом эксперименте нет максимального улавливания пыли, зато можно проследить, что газодинамический коэффициент

скорости дрейфа достигает максимума и далее снижается. Можно предположить, что газодинамический вихрь наиболее эффективно работает только вблизи входа в электрофильтр, а в более далеких от входа областях вообще отсутствует. Тогда снижение коэффициента  $G$  после его выхода на максимум объясняется процессами диссипации энергии газа прошедшего через газодинамический вихрь. Интересным является тот факт, что при напряжении 9,5 кВ, когда коронный разряд только зажигается и потому скорость электрического ветра еще не может быть большой, газодинамический коэффициент скорости дрейфа  $G$  достигает максимального значения, а при более высоких напряжениях его величина снижается. Вероятно, чем выше напряжение и интенсивнее работает электрический ветер, тем более интенсивно начинает проявляться турбулентное движение, которое направленное движение газа в газодинамическом вихре превращает в хаотичное. Поэтому и снижается величина коэффициента  $G$ .

При напряжениях 10,5 и 11,5 кВ после перехода через максимум наблюдается тенденция к снижению коэффициента  $G$ . Этот же эффект наблюдается и на других диаметрах осадительного электрода. Однако проследить, как меняется этот коэффициент на расстояниях, превышающих 0,066 м, невозможно, поскольку на этом расстоянии степень очистки газа уже достигает 99%.

Исследование влияния диаметра осадительного электрода  $d$  на газодинамический коэффициент скорости дрейфа частиц  $G$  (рис. 5.11) показало, что при любом из исследованных диаметров наблюдается тенденция снижения коэффициента  $G$  при увеличении прикладываемого напряжения, что объясняется увеличением турбулентности потока. Хотя при больших диаметрах электрода эта зависимость проявляет себя слабее, чем при малом диаметре.

Кроме того, при диаметре 51 мм наблюдается максимальное значение газодинамического коэффициента скорости дрейфа  $G = 9$ , а при меньшем (36 мм) и большем диаметрах (57,5 мм) это значение ниже. К тому же на диаметре 51 мм разряд устойчиво существует в более широкой области изменения напряжения. Все это говорит о том, что наиболее благоприятные условия для возникновения газодинамического вихря создаются при диаметре осадительного электрода порядка 51 мм.

Сравнение экспериментальных данных по степени улавливания пыли  $\eta$  в электрофильтрах разного диаметра также показывает, что при диаметре осадительного электрода, равном 51 мм, происходит наиболее эффективная очистка. Вероятно, при диаметрах осадительных электродов меньших, чем 51 мм, силы трения газодинамического вихря о стенку

трубы создают большие гидродинамические потери энергии этого вихря. При диаметрах несколько больших 51 мм вихрь все больше начинает замыкаться вдали от стенки трубы и перенос пыли на стенку с помощью этого вихря ослабляется, а при еще большем увеличении диаметра и вообще прекращается. Таким образом, увеличение диаметра осадительного электрода приводит к плавному переходу от газодинамического электрофилтра к классическому электростатическому электрофилтру.

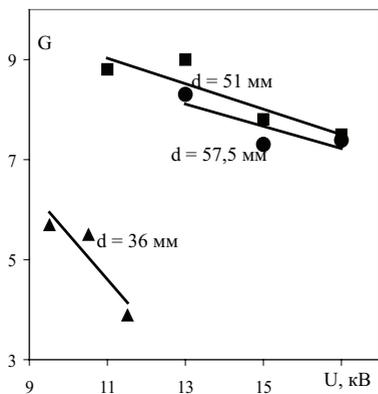


Рис. 5.11. Зависимость газодинамического коэффициента скорости дрейфа  $G$  от напряжения  $U$  и диаметра осадительного электрода  $d$ .

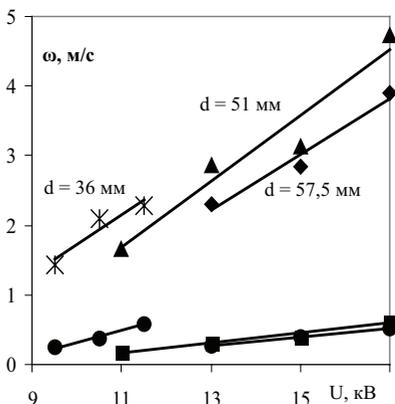


Рис. 5.12. Зависимость газодинамической (верхние кривые) и электростатической (нижние кривые) скорости дрейфа частиц от напряжения  $U$  и диаметра  $d$  осадительного электрода.

Зная величину коэффициента  $G$ , можно вычислить газодинамическую скорость дрейфа  $\omega^*$  по формуле (5.10). Результаты этого расчета приведены на рис. 5.12. На этом рисунке, чтобы его не перегружать избыточной информацией, диаметры осадительных электродов указаны только для газодинамической скорости дрейфа. Кривые электростатической скорости дрейфа располагаются по рисунку ниже при тех же напряжениях. Из рис. 5.12. видно, что газодинамическая скорость дрейфа в 4 – 9 раз превосходит электростатическую скорость дрейфа. Кроме того, при одинаковых напряжениях на осадительных электродах меньшего диаметра наблюдаются более высокие скорости дрейфа частиц, что объясняется более высокой напряженностью электрического поля у электродов меньшего диаметра.

Из рис. 5.12 также видно, что газодинамическая скорость дрейфа, например, для электрода диаметром 51 мм в 3 раза возрастает с ростом напряжения. При этом возникает вопрос: почему согласно рис. 5.11 газодинамический коэффициент скорости дрейфа  $G$  с ростом напряжения снижается, а газодинамическая скорость дрейфа  $\omega^*$  согласно рис. 5.12 возрастает? Это объясняется тем, что обе величины и газодинамическая скорость дрейфа  $\omega^*$ , и электростатическая скорость дрейфа  $\omega$  с ростом напряжения увеличиваются. Однако газодинамическая скорость дрейфа  $\omega^*$  возрастает более высокими темпами, и потому отношение этих скоростей при вычислении дают снижение величины коэффициента  $G$  с ростом напряжения.

Вероятно, экспериментально найденная скорость газодинамического дрейфа частиц  $\omega^*$  должна быть близка к скорости электрического ветра в ГДЭ. В действительности, чем крупнее частица, тем сильнее ее скорость отстает от скорости электрического ветра, и только для очень мелких частиц субмикронных размеров, для которых сила Стокса является достаточно большой, можно утверждать, что их скорость совпадает со скоростью электрического ветра. Так как эксперименты проводились на реальной угольной пыли ТЭЦ г. Бишкек, которая включает в себя частицы разных размеров, то можно говорить лишь о средней скорости дрейфа всех частиц пыли.

На рис. 5.13 изображены процессы, способствующие более быстрому осаждению пыли, чем в классических электрофильтрах. Эксперименты показали, что без диэлектрической трубки 5 коронный разряд с коронирующего электрода загорается еще внутри диэлектрической вставки 3 и по мере приближения к осадительному электроду постепенно увеличивает свою интенсивность. При этом скорость электрического ветра с коронирующего электрода постепенно увеличивается от нуля до максимума. Установка диэлектрической трубки 5 увеличивает напряженность электрического поля, так как место выхода коронирующего провода из диэлектрической трубки эквивалентно превращению коронирующего провода в коронирующее острие. При этом длина, на которой осаждается пыль в ГДЭ, сокращается на десятки процентов.

Кроме того, место стыка осадительного электрода и диэлектрической вставки также является местом усиления неоднородности электрического поля. При этом конец диэлектрической трубки лежит в плоскости стыка диэлектрической вставки и осадительного электрода. Поэтому электрический ветер наиболее интенсивно начинает развиваться на входе в ГДЭ и, как следствие, возникает тороидальное газодинамиче-

ское течение, или для краткости газодинамический вихрь. Этот вихрь сокращает сечение для прохода газа, как это показано на рис. 5.13, и, раздвигая набегающий пылегазовый поток, превращает его из течения в виде сплошного цилиндра сечением  $S = \pi d_1^2/4$  в течение в виде толсто-стенной «трубы» сечением

$$\Delta S = \pi(d_1^2 - d_2^2)/4, \quad (5.11)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  соответственно диаметр осадительного электрода и диаметр стенки пылегазовой «трубы». Оценим толщину «стенок» этой пылегазовой «трубы».

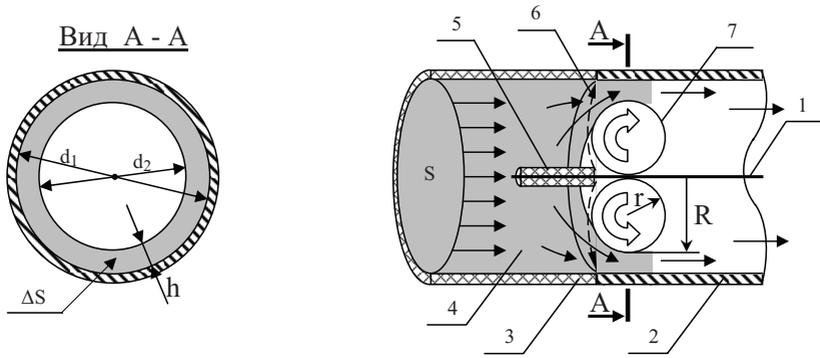


Рис. 5.13. Переход пылегазового течения в виде сплошного цилиндра в течение в виде толстостенной трубы на входе в ГДЭ. 1 – коронирующий электрод; 2 – осадительный электрод; 3 – диэлектрической вставка, служащая для крепления коронирующего провода. (конструкция крепления не изображена); 4 – пылегазовый поток, направление которого указывают сплошные стрелки; 5 – диэлектрическая трубка, закрывающая коронирующий провод; 6 – наиболее интенсивное направление движения электрического ветра, которое изображается пунктирной стрелкой; 7 – тороидальный газодинамический вихрь, направление вращения которого изображается белой стрелкой.

Так как при диаметре осадительного электрода 51 мм и напряжении 17 кВ максимальная скорость дрейфа в ГДЭ достигает  $\omega^* = 4,7$  м/с, то примем эту скорость как нижнее значение скорости электрического ветра. Входящий пылегазовый поток имел скорость  $\omega_0 = 2$  м/с. Таким образом, газодинамический вихрь ускоряет входящий пылегазовый поток с помощью электрического ветра от 2 до 4,7 м/с и проталкивает его через сечение меньшей площади. Запишем уравнение неразрывности для газового потока:

$$S_0 \omega_0 = \Delta S \omega^*, \quad (5.12)$$

из (5.12) следует, что

$$\Delta S = S_0 \omega_0 / \omega^* = \pi d_1^2 \omega_0 / \omega^*. \quad (5.13)$$

Приравняем (5.11) и (5.13) и после элементарных преобразований получим

$$d_2 = d_1 (1 - \omega_0 / \omega^*)^{0.5}. \quad (5.14)$$

После подстановки в (5.14) численных значений получаем, что внутренний диаметр «стенок» пылегазовой «трубы» будет равен  $d_2 = 38,6$  мм. При этом толщина «стенок» этой «трубы»

$$h = (d_1 - d_2) / 2 = (51 - 38,6) / 2 = 6,2 \text{ мм.}$$

Это то расстояние, на котором оказываются самые удаленные от осадительного электрода частички пыли после прохода газодинамического вихря. В действительности скорость электрического ветра больше средней газодинамической скорости дрейфа  $\omega^*$ . Поэтому реальная величина  $h$  еще меньше.

Тороидальное газодинамическое течение, характеризуется двумя радиусами. Большой радиус вдвое меньше диаметра стенок пылегазовой трубы и равен

$$R = 38,6 / 2 = 19,8 \text{ мм,}$$

а меньший радиус примерно еще вдвое меньше, т.е. он равен

$$r = 19,8 / 2 = 9,9 \text{ мм.}$$

(В действительности внутри тора тоже должно быть отверстие с некоторым радиусом. Однако в первом приближении мы этого не учитываем). По этому радиусу  $r$  вихрь разгоняет пыль до газодинамической скорости дрейфа  $\omega^* = 4,7$  м/с. При этом частота вращения газодинамического вихря равна

$$v = \omega^* / (2\pi r) = 4,7 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,0099) = 75,5 \text{ Гц}$$

Центробежное ускорение, которое испытывают пылинки, попадая в вихрь равно:  $a = \omega^{*2} / r = 4,7^2 / 0,0099 = 2,253 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>.

Это очень большое ускорение. Оно в 23000 раз больше ускорения свободного падения. Пылевые частицы практически не могут проникнуть внутрь этого вихря против центробежных сил. Поэтому нет ничего удивительного в том, что с маленького расстояния  $h = 6,2$  мм заряженная пыль легко осаждается электростатически и под действием центробежных сил от газодинамического вихря. Эксперименты показывают, что пылегазовый поток при проходе каждаых 0,6 – 1 диаметра осадительного электрода увеличивает степень очистки газа на порядок. Это позволяет легко получить любую желаемую степень очистки.

## Выводы

1. В ГДЭ период зарядки частиц пыли до выхода на уровень 91% от максимально возможного завершается за период времени порядка 0,009 с, что в 4 – 5 раз меньше полного периода осаждения пыли. Поэтому в первом приближении периодом нестационарного значения заряда на пылинках можно пренебречь и рассчитывать ГДЭ по теории для стационарного заряда, применяемой для классических электрофильтров.

2. Найдено теоретическое объяснение работы газодинамического электрофильтра, которое состоит в том, что в малых разрядных промежутках, порядка 6 см и менее за счет электрического ветра образуется газодинамический вихрь, который увеличивает скорость дрейфа заряженных частиц в 4 – 9 раз по сравнению со скоростью дрейфа в классических электрофильтрах. При этом газодинамическая скорость дрейфа заряженных частиц  $\omega^*$  достигает значения 1,4 – 4,7 м/с. Такая же или еще большая скорость должна быть у электрического ветра в ГДЭ. За счет такой высокой скорости, несмотря на турбулентное перемешивание запыленного газа, степень очистки газа в 99% достигается на расстояниях порядка 7 – 10 см за период времени 0,035 – 0,05 с.

3. Диаметр осадительного электрода, порядка 51 мм близок к оптимальному для ГДЭ. При диаметрах несколько меньших, чем 51 мм, газодинамическая скорость дрейфа  $\omega^*$  снижается за счет силы трения газодинамического вихря о стенку трубы, где создаются повышенные гидродинамические потери энергии этого вихря. При диаметрах несколько больших 51 мм газодинамическая скорость дрейфа  $\omega^*$  снижается за счет того, что вихрь начинает замыкаться вдали от стенки трубы и перенос пыли на стенку с помощью этого вихря ослабляется или может даже вовсе прекратиться.

4. Пылегазовый поток на входе в ГДЭ превращается из сплошного цилиндрического течения в течение в виде толстостенной «трубы», толщина «стенок» которой составляет порядка 6 мм при диаметре осадительного электрода 51 мм и напряжении на коронирующем проводе 17 кВ. При этих параметрах за счет электрического ветра со скоростью порядка 4,7 м/с образуется газодинамический вихрь с радиусом тороидального вращения порядка 10 мм и частотой вращения порядка 75 Гц. Возникающие при этом центробежные силы в 23000 раз превосходят ускорение свободного падения. Поэтому под действием центробежных и электростатических сил пыль легко осаждается и при прохождении каждого 0,6 – 1 диаметра осадительного электрода увеличивает степень очистки газа на порядок, что позволяет легко получить любую желаемую степень очистки [171].

#### **5.4. Линейный коронный факельный разряд в запыленном газе**

Большинство электрофильтров работает на коронном типе разряда отрицательной полярности, так как на отрицательной полярности коронирующего электрода при равных напряжениях наблюдается на 10–15% большая сила тока, чем на положительной полярности [117]. Получение максимальных токов в электрофильтре – главная задача. Поэтому все электрофильтры эксплуатируют в предпробойных режимах, так как в данных условиях достигаются высокие плотности тока коронного разряда и как следствие увеличивается степень очистки газа. Напряжения на электрофильтре при этом составляют величину порядка 50–70 кВ. Значительно уменьшить напряжение и увеличить ток коронного разряда при равных условиях позволяет линейный коронный факельный разряд (ЛКФР). При помощи ЛКФР положительной полярности можно получить при равных условиях и напряжениях силу тока в 3–10 и даже более раз превышающую силу тока положительной короны [172].

ЛКФР реализуется, когда в электрической цепи между катодом и заземляющим электродом возникает газовый зазор такого размера, который может быть пробит высоким напряжением источника питания. Этот зазор назван иницирующим разрядником. Выяснилось, что ЛКФР состоит из трех взаимосвязанных разрядов: импульсного коронного разряда, классической положительной короны, горящей между импульсами, и искрового разряда. При этом импульсная и классическая короны горят в одной области пространства в зоне коронирующего электрода, но в разные моменты времени, а искровой разряд горит в другом месте пространства последовательно по электрической схеме, управляя процессом смены одного типа коронного разряда другим. В период существования искрового разряда в разряднике на коронирующем электроде горит ЛКФР, а в период между искровыми разрядами в разряднике на коронирующем электроде горит классическая положительная корона. Введение иницирующего разрядника со стороны заземленного электрода позволяет реализовать ЛКФР положительной полярности практически для любой конфигурации разрядного контура. Напряжение зажигания ЛКФР определяется размерами разрядного промежутка в зоне коронирования и зазором в иницирующем разряднике. Зона разряда занимает весь разрядный промежуток от коронирующего анода до катода при любых напряжениях [173].

Для исследования характеристик ЛКФР, горящего в запыленном воздухе, использовалась базовая часть экспериментальной установки (рис. 5.1). Отличительной особенностью установки является наличие в электрической цепи инициирующего разрядника, с помощью которого устанавливается необходимый тип коронного разряда.

Изменяя напряжение на коронирующем электроде и регистрируя силу тока, можно исследовать вольтамперные характеристики ЛКФР от момента зажигания разряда до момента перехода ЛКФР в дугу. Наличие инициирующего разрядника, зазор в котором можно регулировать, позволяет получать как обычный коронный разряд положительной полярности (при замкнутых электродах разрядника), либо ЛКФР, когда в разряднике имеется воздушный зазор, периодически пробиваемый электрической искрой.

Запыленность воздуха изменялась в интервале  $8 - 29 \text{ г/м}^3$ . Ее величина определялась по разнице массы пыли в пылегенераторе до и после эксперимента при известном расходе воздуха через установку.

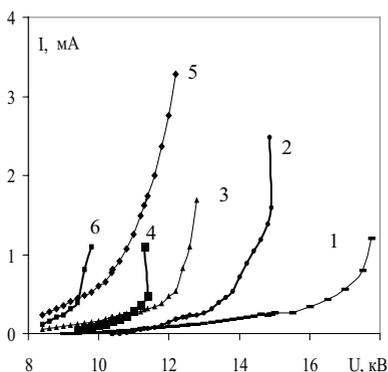


Рис. 5.14. Вольтамперные характеристики короны и ЛКФР. Скорость газа  $V=2,3 \text{ м/с}$ . Температура газа: 1, 2 –  $47^\circ\text{C}$ ; 3, 4 –  $150^\circ\text{C}$ ; 5, 6 –  $250^\circ\text{C}$ .

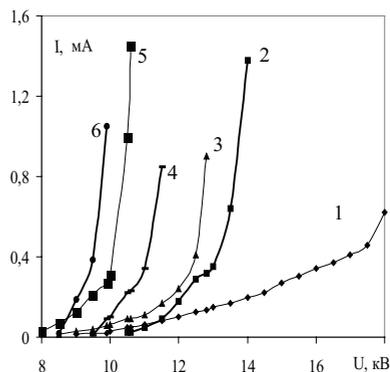


Рис. 5.15. Вольтамперные характеристики короны и ЛКФР. Скорость газа  $V=0,65 \text{ м/с}$ . Температура газа: 1, 2 –  $47^\circ\text{C}$ ; 3, 4 –  $150^\circ\text{C}$ ; 5, 6 –  $250^\circ\text{C}$ .

Вольтамперные характеристики для ЛКФР и положительной короны в незапыленном газе при различных скоростях движения воздуха и температуре в электрофильтре приведены на рис. 5.14 и рис. 5.15. Поведение зависимостей для положительной короны соответствует классическому случаю для каоксиальных цилиндров [174]. Предпробойные

токи в этом случае увеличиваются с ростом температуры, а предпробойные напряжения уменьшаются за счет уменьшения плотности воздуха при повышении температуры.

Для ЛКФР эти же зависимости тока от напряжения и температуры существенно отличаются от классической короны. При увеличении температуры все ВАХ ЛКФР укладываются левее ВАХ классического коронного разряда. При этом в предпробойном режиме сила тока ЛКФР в 3 – 10 раз превышает силу тока классической короны. Электрический пробой межэлектродного промежутка для ЛКФР при температуре более 150°С наступает при меньших токах, чем у классической короны. Это связано с различными механизмами переноса тока во внешней зоне положительной короны и ЛКФР. В первом случае перенос тока осуществляется дрейфом положительных ионов в темной области разрядного промежутка, во втором случае протекание тока разряда обусловлено анодонаправленными стримерами.

Сравнение ВАХ для различных скоростей воздуха показывает, что при низких температурах максимальные токи разряда при возрастании скорости потока воздуха увеличиваются. Это связано с синтезом озона в зоне ЛКФР, который, являясь более электроотрицательным газом, чем воздух, образует отрицательные ионы и снижает проводимость разрядного промежутка. Поэтому рост тока с увеличением скорости воздуха связан с уменьшением концентрации озона, вследствие его выдувания из зоны разряда.

Приведенные зависимости показывают, что ЛКФР обладает преимуществом по сравнению с положительной короной. Так, при температуре около 50°С ток ЛКФР в 10 раз превышает ток положительной короны. Поэтому исследования характеристик ЛКФР в запыленном воздухе проводились при данной температуре.

Вольтамперные характеристики для одинаковой температуры и запыленности, но различных скоростей пылевоздушной смеси приведены на рис. 5.16. Ход кривых аналогичен ВАХ в незапыленном воздухе. Уменьшение силы тока разряда с 2,5 до 2 мА при переходе от незапыленного воздуха к запыленному связано с уменьшением количества легких носителей зарядов в разрядном промежутке, так как они расходуются на зарядку частиц пыли, подвижность которых в электрическом поле гораздо меньше подвижности ионов. При горении разряда наблюдается интенсивное движение воздуха, связанное с «электрическим ветром», поэтому изменение скорости проходящего газа в исследованном интервале скоростей 0,58–2,3 м/с практически не влияет на силу тока [175].

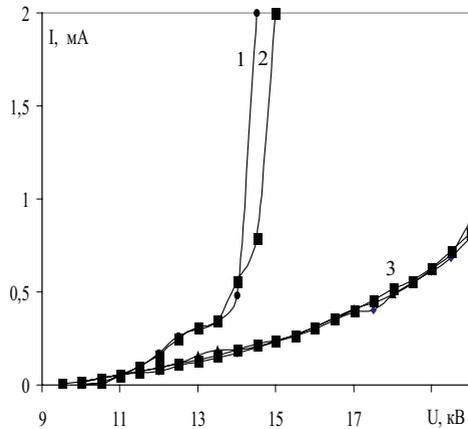


Рис. 5.16. Вольтамперные характеристики короны и ЛКФР в запыленном воздухе. ЛКФР: 1 –  $V=2,3$  м/с, 2 –  $V=0,58$  м/с. Положительная корона – 3. Температура газа  $50^{\circ}\text{C}$ .

Сила тока ЛКФР в запыленном воздухе в области 15 кВ (предпробойный режим) в 8 раз больше тока классической короны. Если учесть, что скорость зарядки частиц определяется удельным током на единицу длины электрофильтра, а в этом отношении ЛКФР обладает явными существенными преимуществами, то можно говорить о перспективности применения ЛКФР в промышленных электрофильтрах и сепараторах.

### 5.5. Эффективность очистки газов в коронных разрядах различного типа

Сравнение эффективности очистки газа от пыли для различных скоростей и напряжений в положительной, отрицательной короне и ЛКФР можно провести, используя зависимость степени очистки газа  $\eta$  в положительной 1, отрицательной 2 короне и ЛКФР 3 от длины электрофильтра  $L$  для скорости газа  $V=2$  м/с (рис. 5.17). Наблюдается изменение степени очистки газа в зависимости от типа разряда при одинаковой скорости запыленного газа, равной 2 м/с. Из графика видно, что при напряжении 14 кВ в отрицательной короне осаждение пыли происходит интенсивнее, чем в положительной короне. Поведение кривой степени очистки в ЛКФР при этих напряжениях существенно отличается. Независимо от напряжения на коронирующем электроде полная степень

очистки в ЛКФР наступает раньше и при меньших длинах, чем в положительной и отрицательной коронах.

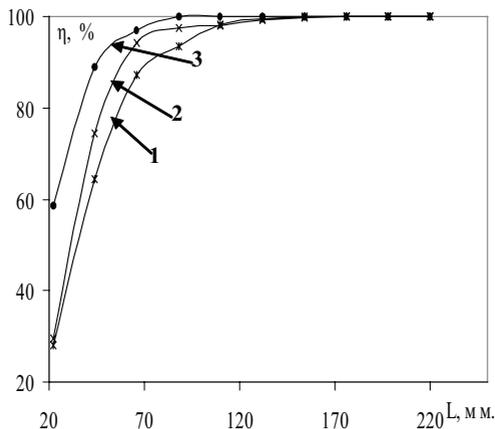


Рис. 5.17. Зависимость степени очистки газа  $\eta$  в положительной 1, отрицательной 2 короне и ЛКФР 3. Для скорости газа  $V=2$  м/с

При скорости 2 м/с, равных длинах осадительного электрода и равных напряжениях наилучшая степень очистки наблюдается в ЛКФР, затем идет отрицательная корона, затем положительная.

Эксперименты показывают, что, начиная с некоторой длины осадительного электрода, ЛКФР обладает преимуществом по отношению к положительной и отрицательной короне в очистке газа от пыли при любых напряжениях коронирующего электрода и скоростях тока газа.

Исследования по степени улавливания пыли на лабораторном электрофилтре длиной 240 мм показывают, что практически с момента зажигания любой разновидности коронного разряда и до максимальных напряжений устройство работает с КПД близким к 100%. Следствием этого являются низкие энергозатраты на очистку газа по сравнению с существующими электрофилтрами.

Удельные энергозатраты  $W_y$  в положительной, отрицательной короне и ЛКФР для скорости газа  $V=2$  м/с приведены на рис. 5.18. Энергозатраты с увеличением скорости потока газов уменьшаются, что связано с большим объемом газа, проходящего через единичное сечение электрофилтра при одинаковых мощностях.

На этих же графиках приведены принятые в промышленности пределы экономически приемлемых удельных энергозатрат (4,5). Из графиче-

ков (рис. 5.18) видно, что удельные энергозатраты в ЛКФР при скорости 2 м/с примерно от 1,1 до 3,3 раза выше, чем энергозатраты в положительной и отрицательной короне. Однако энергозатраты всех типов разряда не выходят за рамки экономической приемлемости.

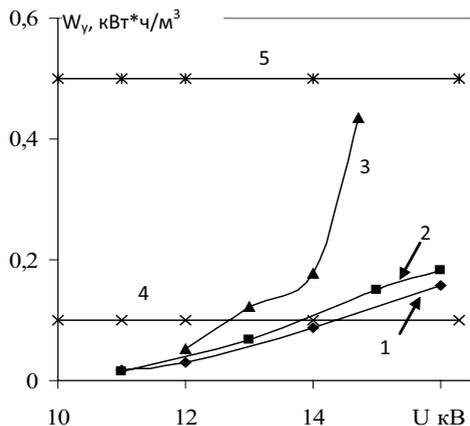


Рис. 5.18. Удельные энергозатраты в положительной 1, отрицательной 2 короне и ЛКФР. Скорость газа  $V=2$  м/с. 5 – максимальный и 6 – минимальный уровни энергозатрат.

Увеличение скорости в 2 раза, с 2 до 4 м/с, ведет к снижению максимальных энергозатрат, в случае ЛКФР в 2 и более раза, а в случае положительной и отрицательной короны почти в 2 раза. Таким образом, удельные энергозатраты в коротком электрофилт্রে в случае положительной и отрицательной короны находятся ниже уровня экономически приемлемых удельных энергозатрат, допустимых в промышленности.

Вне зависимости от скорости газа удельные энергозатраты отрицательной короны меньше энергозатрат в положительной короне и существенно меньше энергозатрат в ЛКФР.

Из графиков видно, что при напряжениях свыше 14 кВ удельные энергозатраты в ЛКФР начинают резко возрастать. Поэтому при напряжениях свыше 14 кВ ЛКФР использовать нежелательно, так как при этом одновременно идет и ухудшение степени очистки газа.

В целом же из результатов исследований можно сделать следующие выводы. С точки зрения создания коротких электрофилтров и экономии металла наилучшим разрядом является ЛКФР, а между положительной и отрицательной короной нет существенной разницы.

С точки зрения экономии электроэнергии наилучшие показатели имеет положительная корона, несколько хуже этот параметр в отрицательной короне и еще хуже в ЛКФР.

## 5.6. Газодинамический электрофильтр

Приведенные результаты исследований в области фильтрации газа в малых разрядных промежутках позволяют сформулировать основные положения технологии очистки газов в газодинамическом электрофильтре от мелких твердых и жидких частиц, которая может быть использована для очистки загрязненных газов как крупных промышленных предприятий, так и для предельно малорасходных газовых выбросов, например, выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания или дымовых выбросов бытовых печей.

Известен классический способ электрофильтрации газов, предложенный впервые Cottrell F.G. [178]. Классический способ электрофильтрации заключается в зарядении частиц пылегазового потока в поле коронного разряда и осаждении их за счет электростатических сил на осадительный электрод. Классический электрофильтр (КЭ) состоит из коронирующего и осадительного электродов. Коронирующим электродом обычно является тонкий провод (порядка 1 – 3 мм в диаметре), на который подается высокое напряжение постоянного тока 60–80 кВ и более. Осадительным может быть трубчатый электрод или электрод квадратного или шестигранного сечения, по оси которого натянута коронирующий электрод либо плоский электрод, и тогда коронирующий электрод располагается в промежутке параллельно плоским осадительным электродам. Запыленный газ движется вдоль коронирующего провода трубчатого осадительного электрода или перпендикулярно коронирующему проводу между плоскими осадительными электродами. С коронирующего провода за счет горения коронного разряда стекают одноименные заряды и в виде ионов газа двигаются в межэлектродном промежутке к осадительному электроду. По пути движения эти ионы сталкиваются с частицами пыли и оседают на них. При этом пыль заряжается тем же знаком заряда, что и коронирующий провод, и начинает за счет электростатических сил притягиваться и приближаться к осадительному электроду. При соприкосновении с осадительным электродом частица пыли отдает ему свой заряд, а сама прилипает к нему. После накопления некоторого слоя пыли эта пыль удаляется с осадительного электрода путем стряхивания или смывается жидкостью.

Ни какого другого способа электрофильтрации газов, кроме как предложенного Cottrell F.G., найти не удалось. На этом способе работают все КЭ. Все многообразие патентов электрофильтров за последние почти 100 лет сводилось к изменению конструкции коронирующих или осадительных электродов и источников питания высокого напряжения.

Недостаток классического способа электрофильтрации состоит в том, что чем меньше размер частицы, тем сильнее сказывается ее трение о газ и потому она медленнее движется в электрическом поле. Поэтому самые мелкодисперсные частицы, проходя ограниченные размеры реальных электрофильтров, не успевают осесть. Для того чтобы они осели, требуется значительно увеличить и без того большие размеры электрофильтра, что экономически неприемлемо. Поэтому мелкодисперсные частицы и пролетают через электрофильтр без их осаждения. Это принципиально непреодолимое физическое препятствие для улучшения степени улавливания твердой пыли или жидких аэрозолей КЭ.

Недостатком классического способа электрофильтрации также является зависимость степени улавливания пыли от электропроводности этой пыли. Чем электропроводность пыли меньше, тем хуже она улавливается. Тогда для увеличения степени очистки сокращают скорость движения запыленных газов через электрофильтр. При этом период нахождения пыли в КЭ может достигать десятков секунд, а габариты КЭ – десятков метров. Даже после выполнения этих условий оказывается, что высокоомные пыли экономически очищаются в лучшем случае только на 85 – 95 %.

Таким образом, капитальные затраты на сооружение электрофильтров, работающих на классическом способе электрофильтрации, весьма высоки, так как они обладают высокой металлоемкостью, занимают большую площадь и потому используются только для очистки больших объемов газов – от нескольких десятков тысяч до более чем 1 млн м<sup>3</sup> в час. В КЭ экономически оправданная степень очистки для электропроводной пыли составляет около 96 – 98%.

Наиболее близким по технической сущности к газодинамическому электрофильтру является вертикальный электрофильтр, работающий на классическом способе электрофильтрации [179], который состоит из труб осадительных электродов, выполненных с внутренним диаметром 200...300 мм с краями, закругленными по радиусу 15...40 мм. Коронирующий электрод выполнен из провода диаметром 0,5...3 мм, а в месте прохода через края труб осадительного электрода на него надеты металлические трубки с наружным диаметром 5...10 мм. При этом один

конец трубок заходит внутрь труб осадительных электродов на глубину 130...250 мм, другой – выступает от краев труб осадительных электродов на 250...400 мм, и края этих трубок закруглены.

Закругление концов осадительных электродов и установление на коронирующие электроды закругленных металлических трубок диаметром большим, чем коронирующие электроды, вблизи их входа в осадительные электроды производилось с целью снижения напряженности электрического поля вблизи концов трубчатых электродов.

Данному фильтру присущи все недостатки КЭ: зависимость степени улавливания от размера и электропроводности частиц, большие габариты, стоимость, невозможность по экономическим соображениям достижения степени очистки близкой к 100%. Увеличение степени очистки газов на проценты или доли процентов после применения предлагаемого технического решения радикально проблемы не решает.

По внешнему виду газодинамический электрофильтр (ГДЭ) может быть очень похож на КЭ. ГДЭ может состоять из трубчатого осадительного и каоксиально расположенного коронирующего электрода либо плоского осадительного электрода, параллельно которому располагается коронирующий электрод. Однако поставленная задача достигается тем, что переход на количественно меньшие межэлектродные расстояния, чем принято в КЭ, и переход на более тонкий коронирующий провод, чем принято в КЭ, приводит к возникновению качественно другого механизма очистки газа. Кроме электростатического механизма, появляется еще и газодинамический механизм переноса частиц к осадительному электроду.

Он возникает так. Коронирующий провод от осадительного электрода устанавливают на расстояние порядка 3 см и менее (у КЭ это 10–20 см), переходят на более тонкий, чем у КЭ коронирующий провод, диаметром порядка 0,2 мм (у КЭ это 0,5–3 мм). Кроме того, желательно покрыть электрической изоляцией ту часть коронирующего провода, которая выходит за габариты осадительного электрода. Выполнение этих условий способствует усилению неоднородности электрического поля на входе в осадительный электрод, увеличению силы тока с единицы длины коронирующего провода и возникновению более сильного, чем у КЭ, электрического ветра на входе в осадительный электрод. За счет электрического ветра возникает газодинамическое течение – вихрь. Этот вихрь оттесняет набегающий запыленный поток к осадительному электроду, где происходит зарядка пылевых частиц и их осаждение на длине осадительного электрода около 10 – 15 см.

Критерием возникновения газодинамического течения является увеличение экспериментально определенной степени улавливания частиц по длине электрофильтра, по сравнению с теоретической степенью улавливания, вычисляемой по уравнению Дейча (5.7). Скорость дрейфа частиц в уравнении Дейча рассчитывается по формуле (5.8), а напряженность электрического поля – по уравнению (5.9).

Экспериментально регистрируемая скорость дрейфа частиц в КЭ примерно вдвое меньше теоретической скорости, вычисляемой по уравнению (5.8). Поэтому теоретическая степень улавливания пыли, вычисляемая по уравнению (5.7) для КЭ является принципиально недостижимым пределом.

Однако эксперимент показывает, что в ГДЭ скорость дрейфа частиц оказывается больше или даже много больше, чем вычисляется по уравнению (5.8). При этом чем меньше размер частиц, тем больше экспериментальная скорость дрейфа превышает теоретически вычисленную. Поэтому и длина осадительного электрода получается на порядки меньше, чем следует из уравнения (5.7). Этот экспериментальный факт является отличительным от прототипа признаком наличия газодинамического течения в электрофильтре.

На рис. 5.19 изображен разрез ГДЭ, состоящий из тонкого проводящего коронирующего электрода 1, на который подается высокое напряжение постоянного тока. Коронирующий электрод 1 расположен по оси цилиндрического осадительного заземленного электрода 2. С торцов заземленного осадительного электрода 2 установлены цилиндрические диэлектрические вставки 3 и 4, которые служат для крепления коронирующего электрода 1 в точках крепления 5 и 6. Коронирующий электрод 1 закрывается в области диэлектрической вставки 4 диэлектрической трубкой 7.

С противоположной стороны ставить диэлектрическую трубку на коронирующий провод 1 не обязательно, так как в этом месте выходит газ, который уже очищен от пыли. В ГДЭ через пылепровод 8 подается входящий пылегазовый поток 9, изображенный светлыми стрелками. На границе между осадительным электродом 2 и диэлектрической вставкой 4 возникает место максимальной неоднородности электрического поля, а также максимальной силы тока и скорости электрического ветра 10 (пунктирная кривая). Этот электрический ветер формирует замкнутое газодинамическое течение 11.

ГДЭ работает следующим образом. Коронный разряд горит с коронирующего электрода 1 на осадительный электрод 2. При этом макси-

мальная сила тока с единицы длины коронирующего электрода 1 реализуется в области максимально неоднородного электрического поля на входе пылегазового потока. Неоднородное электрическое поле создается по трем причинам.

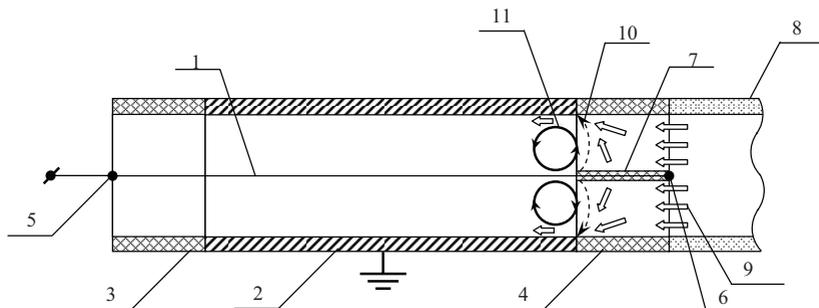


Рис. 5.19. Схема газодинамического электрофильтра. 1 – коронирующего электрода, 2 – осадительный заземленный электрод, 3,4 – диэлектрические вставки, 5,6 – точки крепления, 7 – диэлектрической трубка, 8 – пылепровод, 9 – пылегазовый поток, 10 – электрический ветер, 11 – газодинамическое течение.

1. Неоднородность, возникающая от тонкого коронирующего электрода 1.

2. Неоднородность, возникающая от места стыка кромки осадительного электрода 2 с диэлектрической вставкой 4.

3. Неоднородность, возникающая от места стыка коронирующего электрода 1 с диэлектрической трубкой 7, надетой на этот провод.

Так как коронный разряд горит только в сильно неоднородном электрическом поле, а все эти три причины, суммируя свое воздействие, создают вблизи торца осадительного электрода максимальную неоднородность электрического поля и, как следствие, максимальную удельную (с единицы длины коронирующего провода) силу тока, то в этом месте возникает максимальная скорость электрического ветра 10. За счет электрического ветра, вызванного этим током, на входе пылегазового потока 9 в осадительном электроде 2 возникает замкнутое газодинамическое течение – вихрь, жирная стрелка 11.

Входящий по цилиндрическому пылепроводу 8 пылегазовый поток 9 при своем движении встречается с газодинамическим течением 11 и, взаимодействуя с ним как с конусом, превращается из сплошного цилиндрического течения в течение в виде «толстостенной трубы». Толщина пылегазовых «стенок» этой «трубы» зависит от диаметра оса-

дительного электрода 2, диаметра коронирующего электрода 1 и прикладываемого напряжения. При этом частицы пыли еще до входа в зону горения коронного разряда уже оказываются существенно приближенными к осадительному электроду 2. Затем, попадая в зону горения коронного разряда, частицы пыли заряжаются, начинают притягиваться к близко расположенному осадительному электроду 2 и легко оседают на нем, пройдя короткое расстояние порядка 10 – 15 см. После накопления достаточно толстого слоя пыли эта пыль удаляется путем стряхивания или как-либо иначе.

Газодинамические процессы, происходящие внутри противоположной диэлектрической вставки 3, в данном случае не рассматриваются, так как на выходе из газодинамического фильтра пыль уже экспериментально не регистрируется.

В КЭ из-за больших межэлектродных расстояний газодинамическое течение 11 либо не возникает вовсе, либо замыкается вдаль от осадительного электрода. Поэтому процессы газодинамики в КЭ не вносят существенного положительного вклада в электрофильтрацию пыли и потому в классической теории электрофильтрации даже не рассматриваются.

Пример: при температуре 20°C проводилась электроочистка воздуха, запыленного золой ТЭЦ г. Бишкек. Крупность зольных частиц не превышала 56 мкм. Диаметр осадительного электрода 51 мм, диаметр коронирующего электрода 0,2 мм. Длина осадительного электрода 220 мм. Напряжение, подаваемое на коронирующий провод, составляло 17 кВ, сила тока 0,455 мА. Входная концентрация пыли 4,4 г/м<sup>3</sup>. Энергозатраты на очистку пыли 0,208 кВт×ч/1000м<sup>3</sup>. После проведения эксперимента пыль удалялась из осадительного электрода через щель шириной 3 мм, вырезанную фрезой по его длине и закрываемой на период эксперимента липкой лентой. После эксперимента через эту щель, поддерживаемую в горизонтальном положении, пыль осторожно вытряхивалась в лотки и измерялась масса пыли в каждом лотке. Распределение массы пыли в процентах от всей массы, осевшей по длине осадительного электрода, показано на рис. 5.20. Как видно, основная масса пыли выпадает на первых нескольких сантиметрах от входа пыли в ГДЭ, а на расстояниях превышающих 10–12 см пыль вообще даже визуально не регистрируется.

На рис. 5.21 показана зависимость степени улавливания порошка кремния с дисперсным составом 0,5 мкм и менее от длины газодинамического электрофильтра. Экспериментальная длина 99,9% улавливания

пыли оказалась примерно в 100 раз меньше, чем теоретически вычисленная по формуле (5.8) для КЭ.

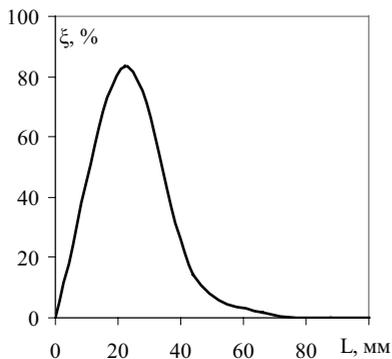


Рис. 5.20. Распределение массы пыли в процентах от всей массы, осевшей по длине осадительного электрода.

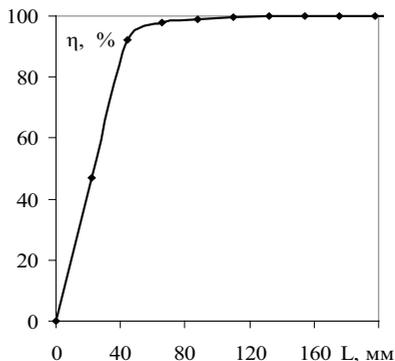


Рис. 5.21. Зависимость степени улавливания от длины  $L$  электрофильтра.

Эксперимент показывает, что в ГДЭ запыленный газ, проходя каждые 0,6–1 диаметр осадительного электрода, увеличивает степень очистки на порядок. Поэтому легко достигается практически 100%-ое улавливание пыли. При этом изменение диаметра пылинок от 56 мкм до 0,5 мкм практически не меняет длину 100%-го улавливания пыли, она остается на уровне 10–15 см. Кроме того, и электропроводные и диэлектрические пыли улавливаются почти одинаково хорошо.

Использование газодинамического способа электрофильтрации по сравнению с классическим при равной производительности позволит иметь следующие преимущества:

1. Сократить длину зоны улавливания пыли от 9,6–24,8 м до порядка 10–15 см, т. е. в 60–250 раз.

2. Сократить массу металла ГДЭ, а значит, и его себестоимость в несколько сот раз, так как ГДЭ можно изготавливать не только более коротким, но и из гораздо более тонкой стали, либо даже из полимерных материалов с электропроводным покрытием и с гораздо меньшими труд- и энергозатратами.

3. Сократить напряжение, необходимое для горения коронного разряда с 60–150 кВ до 10–20 кВ, т. е. в 4–12 раз.

4. Получить практически 100 % улавливания пыли вместо 96–98 % для электропроводной пыли и 85–95% для диэлектрической пыли, в том

числе экологически вредной мелкодисперсной фракции. Это означает получить полностью невидимые выбросы дымовых газов от любых, т. е. и больших и маленьких дымовых труб.

5. Получить дополнительную прибыль от улавливания 2 – 15% ценного сырья, полуфабриката или готового пылевого продукта, которые при использовании КЭ обычно вылетали в трубу, так как их экономически нецелесообразно улавливать с помощью КЭ.

6. Обеспечить газодинамическими электрофильтрами любые – и большие промышленные объекты, и сколь угодно малые объекты: малые котельные, автомобили для фильтрации входящего в них воздуха или выхлопных газов, трубы бытовых печей.

7. Радикально улучшить экологическую обстановку за счет соблюдения самых высоких экологических стандартов вблизи всех пылящих и коптящих объектов, таких как цементные заводы, металлургические комбинаты, тепловые электростанции и вообще, где дымят какие-либо трубы. Это – огромный экологический эффект.

При всем этом энергозатраты на электроочистку газа в газодинамическом электрофильтре составляют 0,15–0,25 кВт ч/1000 м<sup>3</sup> газа, т. е. на уровне хороших электрофильтров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коронные разряды, плазма в которых генерируется элетронноударной ионизацией в сильных неоднородных электрических полях, позволяют реализовать технологии генерации неравновесной плазмы в газах при атмосферном давлении. Уникальные свойства коронного разряда приводят к разнообразным технологическим приложениям, таким как электроочистка газа, создание униполярных газовых или аэрозольных потоков, электрография, генерация озона, дефектоскопия, активация порошковых материалов, накачка сред газовых лазеров и др.

Для реализации конкретного технологического процесса необходимо управлять энергетическими характеристиками коронного разряда. В большинстве случаев это сводится к практически единственному способу – изменению величины напряжения в разрядном контуре.

В работе исследованы характеристики коронного разряда с высокотемпературной зоной ионизации. Результаты исследований показывают, что параметры коронного разряда можно изменять в широких пределах путем нагрева коронирующего электрода внешним источником тока. При этом температура газа изменяется только вблизи коронирующего электрода, где находится генерационная зона, а условия во внешней зоне разряда остаются практически неизменными. Это позволяет модифицировать технологические операции, использующие термическое газофазное осаждение с горячей нитью (HFCVD).

При разработке технологических устройств на основе коронного разряда необходимо на стадии проектирования уделять особое внимание условиям теплообмена в аппарате. Особенно это касается плазмохимических реакторов, так как перегрев разрядной зоны может приводить к термическому разложению продуктов реакции.

Результаты исследований показывают, что в плазмохимическом реакторе на основе коронных разрядов порядка 63% подводимой мощности передается через охлаждаемый электрод в воду. Сделано предположение, что до 30% мощности выводится из системы газовым потоком, содержащим атомарный азот, остальное – тепловые потери через теплоизоляцию и энергия эндотермических реакций образования озона. Интенсивный теплообмен в реакторе происходит в основном за счет рекомбинации атомарного азота на водоохлаждаемой стенке реактора и электрического ветра, возникающего в зоне разряда, что полностью определяет высокую эффективность синтеза озона в коронных разрядах.

Стальные канаты применяются при эксплуатации пассажирских лифтов, горно-шахтного оборудования, транспорта, ракетных установок, станков, сельскохозяйственной техники и т.д. В процессе эксплуатации наиболее важным параметром стальных канатов является их надежность, которая определяется потерей среднего сечения и числом обрывов проволок. Среди многочисленных способов контроля широко применяется трудоемкий метод визуального подсчета обрывов проволок каната на длине одного шага свивки. Разработка эффективных методов оперативного неразрушающего контроля обрыва проволок с помощью регистрации электрического тока коронного разряда как датчика информации о состоянии стального каната представляет научный и практический интерес.

Результаты исследования характеристик коронного разряда в коаксиальной геометрии, где коронирующим электродом является канат, позволяют сделать вывод о возможности применения коронного разряда (положительной и отрицательной полярностей) для обнаружения порывов отдельных проволок стальных канатов. Поскольку измеряемой величиной является ток коронного разряда, выходной сигнал преобразуется в цифровой с помощью стандартного аналого-цифрового преобразователя, что позволяет автоматизировать процесс измерений. Метод позволяет проводить подсчет количества обрывов проволок на единицу длины стального каната с разрешением не менее 0,5 мм между соседними обрывами.

Исследования электрических компонентов внешней среды, в частности ионизация воздуха, имеют большое значение в плане оценки биологического влияния этих факторов. Гигиенические и клинкофизиологические исследования, проведенные в производственных помещениях со сниженным уровнем аэроионизации, показали наличие выраженных изменений функционального состояния жизненно важных систем организма человека. В связи с этим возникла необходимость нормализации нарушенной микроэкологии, т.е. компенсации аэроионной недостаточности.

Анализ литературы по способам ионизации воздуха коронным разрядом отрицательной полярности в условиях больших разрядных промежутков показывает наличие многообразных решений ионизирующего узла прибора. Поэтому всестороннее исследование влияния конструктивных факторов ионизирующего блока на процесс ионизации помещения и скорость наработки озона в нем является актуальной задачей.

Проведенные исследования показывают, что для эффективной работы ионизатора необходимо соединять положительный полюс высоко-

вольтного источника питания с физической землей через бытовую сеть электропитания. Если питание ионизатора автономное, то нужно в конструкции прибора предусматривать клемму заземления или зануления положительного полюса источника питания. Слаботочные ионизаторы воздуха целесообразно оснащать одним коронирующим электродом в виде острия, удаленного на расстояние десяти сантиметров от изолирующих частей устройства. Создание излучателей ионов в виде набора большого количества заостренных электродов является нецелесообразным в виду запираания тока короны объемным отрицательным зарядом вблизи группы коронирующих электродов. Уровень ионизации, создаваемый одиночным коронирующим электродом, составляет величину порядка  $5000 \text{ ион/см}^3$ , которая является лечебной концентрацией ионов. При этом концентрация озона при длительной работе ионизатора не превышает предельно допустимой концентрации.

Коронный разряд может эффективно использоваться в технологии самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) или синтез сжиганием. Осуществляя сжигание кремния с использованием газообразного азота, получают материалы нитридной керамики, а в кислороде или воздухе – оксидной керамики. Горение ультрадисперсного порошка кремния в воздухе или азоте при нормальных условиях не происходит из-за недостатка окислителя. Для проведения подобной реакции необходимы высокие давления реагирующего газа. Один из путей достижения предела воспламенения при нормальных давлениях – проведение реакции в жидком азоте или реализация СВС на порошках кремния сверхнизкой плотности.

Особенности процесса сжигания материалов, в частности кремния, при СВС-синтезе обусловлены физическими свойствами порошков. В данном случае определяющим фактором, влияющим на ход СВС-процесса, является плотность порошкового кремния, имеющего свойство конгломерироваться. Даже после циклонного разуплотнения частички порошка кремния при осаждении вновь могут образовать конгломерированный массив с указанными выше свойствами затрудненного инициирования СВС-процесса. Для ликвидации данного отрицательного явления, учитывая электропроводность порошка кремния, предложено при выходе из циклона производить зарядку частиц порошка, что с высокой долей вероятности может привести к формированию массива порошкового кремния с низкоплотной структурой, вследствие кулоновского взаимодействия электрически нейтральной либо заряженной обратным, относительно заряда частичек, знаком подложки с частицами

порошка. В данном случае используется зарядка частиц кремния в поле коронного разряда как наиболее рациональный метод по простоте и изящности применения.

Наибольшее промышленное применение коронный разряд получил в системах электрофильтрации и сепарации различных веществ. С момента запуска первого электрофильтра техника электрофильтрации прошла большой путь развития. Были исследованы возможности использования различных коронных разрядов. Большое влияние на конструкции промышленных электрофильтров оказывало развитие техники высоких напряжений. В настоящее время оптимизация работы электрофильтра происходит в направлении увеличения межэлектродных расстояний.

Результаты исследования процессов электрофильтрации газа в условиях малого разрядного промежутка позволили выработать направление оптимизации работы электрофильтров совершенно противоположное – уменьшение разрядных промежутков.

Из проведенных исследований следует, что электрофильтр с малым разрядным промежутком по сравнению с классическим электрофильтром равной производительности позволяет реализовать следующие преимущества: сократить длину зоны улавливания пыли от 9,6-24,8 м до порядка 15 см; уменьшить массу металла, необходимого для создания электрофильтра, и его стоимость в несколько сот раз; снизить напряжение, необходимое для горения коронного разряда, в (5-10 раз) с 100 кВ до 10-20 кВ; получить 100 % улавливания пыли вместо 96-98 %, в том числе самой экологически вредной мелкодисперсной фракции. При всем этом энергозатраты на электроочистку газа остаются на уровне хороших классических электрофильтров.

В работе показано, что высокая эффективность работы электрофильтра в условиях малого разрядного промежутка (порядка 6 см и менее) обеспечивается электрическим ветром, который формирует газодинамический вихрь, увеличивающий скорость дрейфа заряженных частиц в 4 – 9 раз по сравнению со скоростью дрейфа в классических электрофильтрах. Уменьшение межэлектродного расстояния позволяет использовать для электрофильтрации газодинамическое течение, влиянием которого на больших межэлектродных расстояниях у классических электрофильтров можно пренебречь.

Результаты исследований в области фильтрации газа в малых разрядных промежутках позволили сформулировать основные положения технологии очистки газов в газодинамическом электрофильтре от мелких твердых и жидких частиц. Она может быть использована для очист-

ки загрязненных газов, как крупных промышленных предприятий, так и для предельно малорасходных газовых выбросов, например выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания или дымовых выбросов бытовых печей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Cotrell F.G.* Art of Separating Suspended Particles from Gaseous Bodies. – U.S. Patent, 895,729 (1908)/
2. *Cotrell F.G.* The Electrical Precipitation of Suspended Particles // *J. Ind. and Chem.*, 3, 542 (1911).
3. Экотехника / Под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль: Русь, 2004. – 424 с.
4. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Niyazaliev I.A., Tokarev A.V.* The estimation of steel rope quality by a corona discharge. // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies, Minsk, Belarus, 16-22 September, 2006, Vol.2, p. 808–811.
5. *Литвинов В.Е.* Применение теории плазмы для исследования физических процессов в электрографии и электростатической печати // *Прикладная физика*, 2002. – № 4. – С. 38–47.
6. *Moore A.D.* Electrostatics and Its Applications. – John Willey & Sons, New-York, 1973.
7. *Balcer, B.E.; Lai, F.C.* EHD-Enhanced Drying with Multiple-Wire Electrode // *Drying Technology*, 2004, Vol.22, Issue 4, p. 821–836.
8. *Lai, F.C.; Huang, M.; Woong, D.S.* EHD-Enhanced Water Evaporation // *Drying Technology*, 2004, Vol.22, Issue 3, p. 597–608.
9. *Niedbalski, Jorge.* High-voltage multichannel rail gap switch triggered by corona discharge // *Review of scientific Instruments*, 2003, Vol. 74, Issue 7, p. 3520–3524.
10. *Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И.* Электросинтез озона. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 236.
11. *Кожин В.Ф., Кожин И.В.* Озонирование воды. – М.: Стройиздат, 1974. – 160 с.
12. *Орлов В.А.* Озонирование воды. – М.: Стройиздат, 1984. – 88 с.
13. *Ono, Ryuo; Oda, Tetsuji.* Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // *Journal of Applied Physics*, 2003, Vol.93, Issue 10, p. 5876–5883.
14. *Ma, Hongbin; Qiu, Yuchang.* A study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors // *Ozone: Science & Engineering*, 2003, Vol.25, Issue 2, p. 127-136.
15. *Malik M.A., Ubaid-ur-Rehman, Ghaffar, A., and Ahmed, K.* Synergistic effect of pulsed corona discharges and ozonation and decolourization of methylene blue in water. *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 11, № 3, 2002, p. 236–241.

16. *Malik, M.A.* Synergistic effect of plasmacatalyst and ozone in a pulsed corona discharge reactor on the decomposition of organic pollutants in water. // *Plasma Sources Science and Technology*, 2003, Vol. 12, № 4, p. 826–833.
17. *Malik, Muhammad Arif; Ahmed, Munir; Ejaz-ur-Rehman; Naheed, Riffat; Ghaffar, Abdul.* Synthesis of Superabsorbent Copolymers by Pulsed Corona Discharges in Water // *Plasma & Polymers*, 2003, Vol. 8, Issue 4, p. 271–279.
18. *Pemen, A.J.M; Nair, S.A.; Yan, K.; van Heesch, E.J.M.; Ptasinsky, K.J.; Drinkenburg, A.A.H.* Pulsed Corona Discharges for Tar Removal from Biomass Derived Fuel Gas. // *Plasmas & Polymers*, 2003, Vol. 8, Issue 3, p. 209–224.
19. *Ming-Wei Li; Zheng Hu; Xi-Zhang Wang; Quing Wu; Yi Chen.* Synthesis of carbon nanowires using dc pulsed corona discharge plasma reaction // *Journal of Materials Science*, 2004, Vol. 39, Issue 1, p. 283–284.
20. *Ming-Wei Li; Zheng Hu; Xi-Zhang Wang; Quing Wu; Yi Chen.* Low-temperature synthesis of carbon nanotubes using corona discharge plasma reaction at atmosphere pressure // *Journal of Materials Science Letters*, 2003, Vol. 22, Issue 17, p. 1223–1224.
21. *Groza, A., Ganciu-Petsu, M; Surmeian, A.; Popescu, I.I.* Oils Polymerization Induced by Corona Discharges at Atmospheric Pressure // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, 2004, Vol. 416, Issue 1, p. 217–222.
22. *Salvermoser, M.; Murnick, D.E.* Efficient, stable, corona discharge 172 nm xenon excimer light source // *Journal of Applied Physics*, 2003, Vol. 94, Issue 6, p. 3722.
23. *Lo, Shui-Yin; Lobo, Julio D.; Blumberg, Seth; Dibble, Theodore S.; Zhang, Hu; Tsao, Chun-Cheng; Okumura, Mitchio.* Generation of energetic He atom beams by a pulsed positive corona discharge // *Journal of Applied Physics*, 1997, Vol.81, Issue 9, p.5896–5905.
24. *Puchkarev, Viktor; Gundersen, Martin.* Energy efficient plasma processing of gaseous emission using a short pulse discharge. // *Applied Physics Letters*, 1997, Vol.71, Issue 23, p.3364–3367.
25. *Wang, F., Liu, J.B., Sinibaldi, J., Brophy, C., Kuthi, A., Jiang, C., Ronney, P.D., Gundersen, M.A.* Transient Plasma Ignition of Quiescent and Flowing Fuel Mixtures // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, Vol. 33, pp. 844–849.

26. *Liu, J.B., Wang, F., Li, G., Kuthi, A., Gutmark, E.J., Ronney, P.D., Gundersen, M.A.* Transient plasma ignition // IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, Vol.33, p. 326–327.
27. *Akishev, Yu.S.; Grushin, M.E.; Monich, A.E.; Napartovich, A.P.; Trushkin, N.I.* One-Atmosphere Argon Dielectric-Barrier Corona Discharge as an Effectivr source of Cold Plasma for Treatment of Polymer Films and Fabrics // High Energy Chemistry, 2003, Vol. 37, Issue 5, p. 286-290.
28. *Mainelis G., Welleke, K., Adhikari, A., Reponen, T., and Grinshpun, S.A.* Design and Collection Efficiency of a New Electrostatic Precipitator for Bioaerosol Collection. Aerosol Science and Technology, 2002, 36, p.1073-1085.
29. *Mainelis, G., Welleke, K., Baron, P., Reponen, T., Grinshpan, S.A., Gorny, R.L., and Trakumas, S.* Electrical Charges Airborne Microorganisms // J. Aerosol Sci., 2001, 32, 1087-1110.
30. *McLean, K.J.* Electrostatic Precipitation// IEE Proceedings, 1988, 135 (6), p.347-362.
31. *Talaie, M.R., Fathikaljani, J., Taheri, M., and Bahri, P.* Mathematical Modelling of Double-Stage Electrostatic Precipitators Based on a Modified Eulerian Approach // Aerosol Science and Technology, 34, 2001, p.512-519.
32. *Flagan, R.C., and Seinfeld, J.H.* Fundamental of Air Pollution Engineering. 1988, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
33. *Sheng-Hsiu Huang and Chin-Chien Chen.* Loading Characteristics of a Miniature Wire-Plate Electrostatic Precipitator // Aerosol Sci. and Technology, 2003, 37, p.109-121.
34. *Sheng-Hsiu Huang and Chin-Chien Chen.* Filtration Characteristics of a Miniature Electrostatic Precipitator // Aerosol Science and Technology, 2001, 35, p.792-804.
35. *White, H., J.* Electrostatic Precipitation of Fly Ash. // J. Air. Pollut. Controll. Assoc. // 1977, 27, p.15-21; 114-120.
36. *Bohm, J.* Electrostatic Precipitators. 1982, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
37. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. – 2002. – Т. 2. – № 2. – С. 47-52.
38. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* Физика горения линейного коронного факельного разряда // Третий международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: Сб. мат. – Иваново, 2002. – С. 376.

39. *Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Токарев А.В.* Формирование линейного коронного факельного разряда // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28. – № 8. – С. 1-6.
40. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V.* Development of Linear Corona Torch Discharge. // Plasma Physics Reports, Vol.28, No.10, 2002, p.866.
41. *Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Токарев А.В.* Исследование возможности создания электрофильтров на малых разрядных промежутках. Доклад на юбилейной конференции КРСУ, 2003.
42. *Ашмарин Г.В., Токарев А.В.* Управление индуктивностью разрядной цепи линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. – 2003.
43. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V.* Pulse-periodic corona discharge in technologies of gaseous precipitation // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies, Minsk, Belarus, 16-22 September, 2006, Vol.2, p.812-815.
44. *Леб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах. – М.; Л: Тех. теор. издат., 1950.
45. *Пик Ф.* Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. – Л.: Госэнергоиздат, 1934.
46. *Капцов Н.А.* Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. – М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947.
47. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
48. *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
49. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах. – М.: ИЛ, 1969.
50. *Kossyi I.A., Kostinsky A.Y., Matveyev A.A., and Silakov V.P.* Kinetic Scheme of the Nonequilibrium Discharge in Nitrogen – Oxygen Mixtures // Plasma Sources Sci. Technol., 1 (3), 207-220 (1992).
51. *Cobine J.D.* Gaseous Conductors: Theory and Engineering Applications, Dover Publications, Inc., New-York, 1958.
52. *Morrow R.* Theory of negative Corona in Oxygen // Physical Review A 32 (3) 1799-1809 (1985).
53. *Trichel G.V.* // Phys. Rev. 1938. V. 54, p.1078.
54. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И.* Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. I. Эксперимент // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27. – № 6. – С. 550-562.

55. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И.* Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. II. Расчет // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27. – № 6. – С. 563–572.
56. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Дерюгин А.А., Напартович А.П., Панькин М.В., Трушкин Н.И.* Интегральные и локальные характеристики протяженной положительной короны в воздухе в режиме нелинейных колебаний: Теория // Физика плазмы. – 1999. – Т. 25. – № 11. – С. 952-956.
57. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Дерюгин А.А., Напартович А.П., Панькин М.В., Трушкин Н.И.* Интегральные и локальные характеристики протяженной положительной короны в воздухе в режиме нелинейных колебаний: Эксперимент // Физика плазмы. – 1999. – Т. 25. – № 11. – С. 941-951.
58. *Lowke J.J., Morrow R.* Theory of Electric Corona Including the Role of Plasma Chemistry // Pure and Appl. Chem, 66 (6), 1994, 1287–1294.
59. *Иванов В.Я., Ильин В.П.* Решение смешанных краевых задач для уравнения Лапласа методом интегральных уравнений // Типовые программы решения задач математической физики / Под ред. В.В. Павленко. – Новосибирск: ОАН СССР, 1976. – С. 5–21.
60. *Васяев В.И., Верещагин И.П.* Метод расчета напряженности поля при коронном разряде // Электричество, 1971. – № 5. – С. 34–39.
61. *Васяев В.И., Верещагин И.П.* К расчету характеристик униполярного коронного разряда в системе электродов – «ряд проводов между плоскостями» // Электричество, 1972. – № 5.
62. *Попков В.И.* Особенности коронного разряда при высоких напряженностях поля // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1965. – № 4. – С. 69-85.
63. *Головин Г.Т., Брик Е.Б.* Расчет на ЭВМ отрицательного коронного разряда острие–плоскость // Вычислительные методы в программировании. Сб. работ ВЦ МГУ. – 1974. – № 23.
64. *Верещагин И.П., Заргарян И.В., Семенов А.В.* Расчет электростатического поля между иглой и плоскостью // Электричество. – 1974. – № 11. – С.54–58.
65. *Шевцов Э.Н.* Исследование униполярного коронного разряда в системе гиперболоид–плоскость // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1980. – № 2. – С. 85–91.
66. *Stearns, Richard G.* The positive corona in air. A simplified analytic approach // Journal of Applied Physics, 1989, Vol. 66, Issue 7, p.2899–2914.

67. *Александров Г.Н.* Начальные стадии отрицательной короны с острия // ЖТФ. – 1957.
68. *Yamada, Kimio.* An empirical formula for negative corona discharge current in point-grid electrode geometry // Journal of Applied Physics, 2004, Vol. 96, Issue 5, p. 2472–2475.
69. *Зыков В.А.* Вольтамперная зависимость коронного разряда острие–диск в воздухе // ТВТ. – 1972. – Т. 10. – № 2.
70. *Mellor, D.J.* Current-voltage characteristics of corona discharge between coaxial cylinders in helium +1,0% hydrogen // International Journal of Electronics, 1974, Vol. 36, Issue 1, p.13–16.
71. *Rajiu, G.R.Govinda; Guru Murthy, G.R.* Wire-cylinder corona discharge with the wire at positive potential // International Journal of Electronics, 1979, Vol. 46, Issue 5, p. 497–507.
72. *Ferreira, G.F. Leal; Oliveira, O.N.; Giacometti, J.A.* Point-to-plane corona: Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component // Journal of Applied Physics, 1986, Vol. 59, Issue 9, p. 3045–3050.
73. *Bucella, C.* Computation of V-I Characteristics in Electrostatic Precipitators // J. Electrostatics, 1996, p.37, 277–291.
74. Дымовые электрофилтры / Под ред. В.И. Левитова. – М: Энергия, 1980.
75. *Месеняшин А.И.* Электрическая сепарация в сильных полях. – М: Недра, 1978.
76. *Mesenyashin, A.I.* Kinetics of Particle Charging in an Electrostatic Field of Separators // Magnetic & Electrical Separation, 2002, Vol. 11, Issue 4, p. 225–238.
77. *White H.J.* Industrial Electrostatic Precipitation. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
78. *Pingao Shi, Dezhen Wang.* Numerical simulation of pulsed corona discharge with dust particles at atmospheric pressure // Physics of Plasmas. – 2005. – Vol.12. – Issue 4.
79. *Бортников Ю.С., Нестеров В.А., Рубашов И.В.* Экспериментальное исследование коронного разряда в потоке воздуха // ЖТФ. – 1969. – Т.39. – Вып. 11.
80. *Верещагин И.П., Гоник А.Е.* Экспериментальное исследование электрического ветра при наличии внешнего потока // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1980. – №4. – С.95–101.
81. *Верещагин И.П., Гоник А.Е.* Влияние электрического ветра на процесс электроосаждения // Электричество. – 1981. – № 10. – С.44–47.

82. *Верецагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974.
83. *Волков В.Н., Палкин Л.Н., Семенов В.К.* К гидродинамике электрического ветра // Сильные электрические поля в технологических процессах. – М.: Энергия. – 1971. – Вып. 2.
84. *Choi, B.S., and Fletcher C.A.J.* *Computation of Particle Transport in an Electrostatic Precipitator*, J, *Electrostatics*, 1997, 40&41, p.413–418.
85. *Choi, B.S., and Fletcher C.A.J.* Turbulent Particle Dispersion in an Electrostatic Precipitator. *Appl. Math. Modelling*, 1998, 22, p.1009–1021.
86. *Leonard, G.L., Mitchner, M., and Self, S.A.* Experimental Study of the effect of Turbulent Diffusion on Precipitator Efficiency, *J. Aerosol Sci.*, 1982, 11, p.271.
87. *Davidson, J.H. and Shaughnessy E.J.* Turbulence Generation by Electric Body Forces // *Experiments in Fluids*, 1986, № 4, p.17–26.
88. *Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В.* Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978.
89. *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982.
90. *Воробьев Г.А., Месяц Г.А.* Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. – М.: Госатомиздат, 1963.
91. *Chen J.* Direct current corona-enhanced chemical reaction // P.h.d. dissertation, University of Minnesota, 2002.
92. *Evans, R.W., Inculer, I.I.* The Radius of the Visible Ionization Layer for Positive and Negative Coronas // *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1978, IA-14(6), p.523-525.
93. *Lowke, J.J. and Morrow, R.* Theory of Electric Corona Including the Role of Plasma Chemistry // *Pure & Appl. Chem.*, 1994, 66(6), p.1287-1284.
94. *Kenty C.* Photoelectric Yields in the Extreme Ultraviolet // *Physical Review* 44 (11), 891-897, 1933.
95. *Condon E.U., Odishaw H.* Handbook of Physics, 2nd ed., McGraw-Hill, New-York, 1967.
96. *Akishev, Yu.S.; Aponin, G.I.; Karal'nik, V.B.; Monich, A.E.; Trushkin, N.L.* Structure of the Surface Streamers of an AC Barrier Corona in Argon // *Plasma Physics Reports*, 2004, Vol.30, Issue 12, p.1012–1027.
97. *Cernac, Mirco; Hosokawa, Tatsuzo; Inoshima, Masauyuki.* Positive-streamer-like phenomena in point-plane corona gaps: Trichel pulses

- and high-pressure cathode sheath instabilities // *Applied Physics Letters*, 1990, Vol. 57, Issue 4, p. 339–341.
98. *Naidis, J.V.* Effects of nonlocality on the dynamics of streamers in positive corona discharge // *Technical Physics Letters*, 1997, Vol. 23, Issue 6, p.493–495.
  99. *Popov, N.A.* Spatial Structure of the Branching Streamer Channels in a Corona Discharge // *Plasma Physics Reports*, 2002, Vol.28, Issue 7, p.615–623.
  100. *Morrow, R., and Lowke, J.J.* Streamer Propagation in Air // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, Vol.30, № 4, p.614–627.
  101. *Takahashi, Y., Yoshida, M., Anma, Y., Kobayashi, S., and Endo, M.* Thickness and Luminosity Distribution of Positive Corona Sheath in Air // *J. Phys. D: Appl Phys.*, 1982, Vol. 15, № 4, p. 639–653.
  102. *Yehia, A., Mizuno, A., and Takashima, K.* On the Characteristics of the Corona Discharge in a Wire-Duct Reactor // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, Vol. 33, p.2807–2814.
  103. *Uhm, Han S.; Lee, Woong M.* An analytical theory of corona discharge plasmas // *Physics of Plasmas*, 1997, Vol.4, Issue 9, p.3117-3129.
  104. *Uhm, Han S.* Influence of chamber temperature on properties of the discharge system // *Physics of Plasmas*, 1999, Vol.6, Issue 2, p.623–627.
  105. *Александров Г.Н.* Коронный разряд на линиях электропередачи – М.: Энергия, 1964, 228 с.
  106. *Hermstein W.* // *Arch. Electrotech.* – 1960. – V. 45. – P. 209.
  107. *Богданова Н.Б., Попков В.И.* К вопросу об аномальных разрядах при высоких постоянных напряжениях // *ДАН СССР*, 1959. – Т. 129. – № 2. – С. 21-25
  108. *Попков В.И.* Теория биполярной короны на проводах // *Изв. АН СССР, ОТН*, 1948. – № 4. – С.433-448.
  109. *Попков В. И., Богданова Н. Б.* О параметрах факельного разряда в воздухе при атмосферном давлении // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1968. – № 1. – С. 79-87.
  110. *Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона в наносекундном коронном разряде // *Материалы 8 Всесоюзной конференции «Физика низкотемпературной плазмы»*. – Минск. – 1991. – Ч. 3. – С. 91.
  111. *Амиров Р.Х. Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона и разложение формальдегида в импульсной короне // *Материалы конференции «Физика и техника плазмы»*. – Минск, 13-15 сентября. 1994. – С. 321.

112. *Корбцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л.* Энергосберегающие озонаторы на основе импульсного коронного разряда // Третий международный конгресс «Вода: экология и технология» – ECWATECH-98. – М., 1998, – с. 659.
113. *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160. – Вып. 7. – С. 49-82.
114. *Лелевкин В.М., Ниязалиев И.А., Токарев А.В.* Усредненные характеристики коронного разряда с высокотемпературной зоной ионизации // Вестник КРСУ.
115. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под общ. ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1978. – С. 192–193.
116. *Першин А. Ф., Федорова А. В.* Озонаторы коронного разряда в медицине, пищевой промышленности и сельском хозяйстве // Третий международный конгресс «Вода: экология и технология» – ECWATECH-98. – М., 1998. – С. 671-672.
117. *Ужов В.Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И., Решидов К. К.* Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – С. 392.
118. *Ашмарин Г. В., Лелевкин В. М., Ниязалиев И. А., Токарев А.В., Юданов В. А.* Значение электрического ветра для теплообмена в технологических устройствах на основе коронного разряда // Вестник КРСУ. – 2006 г. – Т. 6. – № 5. – С. 147.
119. *Еремин. Е. Н.* Элементы газовой электрохимии. – М.: МГУ, 1968. – С. 80.
120. *Перельман В. И.* Краткий справочник химика. – М.: ГНТИХЛ, 1955. – С. 253.
121. *Афанасьев В. Н., Исаев С. И., Кожин И. А. и др.* Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена. – М.: Высш. шк., 1986. – С 225.
122. РД РОСЭК 012 – 97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки.
123. *Котельников В.С., Сухоруков В.В.* // Безопасность труда в промышленности. – 1998. – № 5. – С. 34.
124. Предварительный патент. Способ обнаружения мест дефектов стальных канатов. №-481. Кыргызская республика. Бишкек, 2001.
125. *Токарев А.В.* Обнаружение мест дефектов и порывов проволок стальных канатов // Вестник КРСУ, 2002. – Т.2. – №4. – С.120–123.

126. Чумаков Г.Ф., Ефимов Ю.С., Шварц Я.М. // 3-й Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Тез. докл. – Тарту, 1986. – С. 78.
127. Eichmeier J. Beitrag zum Problem der Struktur der atmosphärischen Kleinionen.-«Zeitschrift für Geophysik», 1968, Vol.34, S.297–322. (О структуре легких атмосферных ионов).
128. Knoll M., Eichmeier J., Schon R. Properties, Measurement and Bioklimatik Aktion of «Small» Multimolekular Atmospherik Ions.- «Advances in Electronics and Electron Physic», 1964, Vol. 19, p.177-254 (Свойства, измерение и биоклиматическое действие «малых» мультимолекулярных атмосферных ионов.).
129. Васильев Л.Л. Влияние атмосферных ионов на организм. – Л., 1960.
130. Воронин Н.М. Основы медицинской и биологической климатологии. – М., 1981.
131. Чернявский Е.А. Аэроионизация в гигиене труда. Сравнительная характеристика ионизации атмосферы районов Средней Азии и аэро- и гидроаэроионизации в лечебных кабинетах и промышленных условиях. – Л., 1966. – С. 187.
132. Разрешение Наркомздрава СССР на применение аэроионотерапии, 1931.
133. Методические указания по лечебному применению ионизированного воздуха (аэроионотерапия). Утверждены Управлением спец. медицинской помощи Минздрава СССР 11 мая 1959 г.
134. ГОСТ 12.1.005-76. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.
135. Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений № 2152-80 от 12. 02. 80 г.
136. Чижевский А. Л. Аэроионизация как физиологический, профилактический и терапевтический факторы и как новый санитарно-гигиенический метод кондиционированного воздуха. – М., 1933.
137. Чижевский А. Л. Осаждение микроорганизмов воздуха внутри помещений при помощи аэроионного потока. – М., 1934.
138. Чижевский А. Л. Теоретические основы работы электроэффлювильного ионизатора. – М., 1939.
139. Чижевский А. Л. Руководство по применению ионизированного воздуха в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. – М., 1969.

140. *Минх А.А.* Ионизация воздуха и ее гигиеническое значение. – М., 1963.
141. *Павлаишвили И.С., Джугели М. С.* // Вопросы курортологии. – 1982. – № 1. – С. 14–16.
142. *Церфас К.Э.* Матер. республ. конф. физиотерапевтов и курортологов. – Ташкент, 1966. – С. 41–44.
143. *Ибрагимов А.А.* Естественная аэроионизация в горной местности и подземных пещерах Киргизии // Вопросы курортологии ФТ и ЛФК. – М., 1985. – №5. – С. 27.
144. *Ибраимов А.А.* О необходимости дальнейшего развития прикладной аэрологии // Вопросы курортологии физиотерапии и лечебной физической культуры. – М.: Медицина, 1988. – № 3.
145. *Ибрагимов А.А.* Новые наблюдения и разработки по использованию фактора аэроионизации в климато-физиотерапии: Матер. республ. научно-практической конференции «Актуальные вопросы физиотерапии и восстановительного лечения» 21-22 сентября. – Бишкек, 1995. – С. 62–63.
146. *Баев, В.И.* Система аэроионизации клеточных батарей птичника / В.И. Баев, М.Е. Бочаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 5. – С. 19–21.
147. Устройство для ионизации воздуха и его перемещения с помощью вентилятора и электрического ионного ветра: Пат. 2262172 РФ, МПК7 H01T19/00, C01B13/11, A61N1/44, F24F3/16 / М.Е. Бочаров; заявитель и патентообладатель М.Е. Бочаров №2003119482/09; заявл. 26.06.03; опубл. 10.08.05. Бюл. №28. – 7 с.: ил.
148. *Токарев А.В., Лелевкин В. М., Юнусалиева А. О.* Ионизация воздуха коронным разрядом отрицательной полярности в условиях больших разрядных промежутков // Тез. докл. Международной научной конференции «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». 7-9 сентября 2006 г. – Бишкек. – С. 96.
149. *Мержанов А.Г., Шкиро В.М., Боровинская И.П.* Патент СССР № 255221 (1971).
150. *М. Коидзуми.* Химия синтеза сжиганием. – М., 1998.
151. *Шкадинский К.Г., Хайкин Б.И., Мержанов А.Г.* Физика горения и взрыва, 1971. – Т.7. – №19.
152. *Шкиро В.М., Боровинская И.П., Нерсиян Г.А.* Физика горения и взрыва, 1978. – Т.14. – №58.
153. *Merzhanov A.G., Khaikin B.I.* Prog. Energy Combust.Sci., 1988, Т. 14, №1.

154. *Tokarev A.V., Lelevkin V.M., Kanygina O.N., Petrenko N.L.* Ultra-dispersed silicon powder combustion activation by corona discharge plasma. 17th International Symposium on Plasma Chemistry Toronto, Ontario Canada August 7th-12 th 2005.
155. *Лелевкин В. М., Каныгина О.Н., Макаров В.П., Токарев А.В.* Моделирование и технология получения керамики на основе кремния. – Бишкек: КРСУ, 2008. – С.53-64.
156. *Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачеева Л.П., Широков Н.Н.* Исследование плазменных образований, инициируемых эрозионным разрядом // ЖТФ. – 1990. – Т. 60. – Вып. 12. – С. 57-64.
157. *Лелевкин В. М., Ниязалиев И. А., Токарев А. В.* Создание оптимальных гетерогенных потоков для плазмохимических реакторов // Тез. док. Междунар. науч. конф. «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». 7–9 сентября 2006 г. – Бишкек. – С. 97.
158. *Токарев А.В., Каныгина О.Н., Лелевкин В.М., Петренко Н.Л.* Активация ультрадисперсного порошка кремния плазмой коронного разряда // Вестник КРСУ. – 2005. – Т. 5. – № 1. – С. 43.
159. *Мержанов А. Г.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез // Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник / Под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – М.: Химия, 1983. – С. 6-44.
160. *Токарев А.В. Петренко Н.Л.* Синтез оксид-нитридных керамических материалов из низкоплотного порошка кремния / Международный семинар «Проблемы моделирования и развития технологии получения керамики» 1–4 сентября 2005. – Бишкек: КРСУ, 2005. – С. 150.
161. *Кацнельсон Б.В., Ларионов А.С., Калугин А.М.* Электровакуумные электронные и ионные приборы. – М.: Энергия, 1978.
162. *Чекалов Л.В.* Анализ схемы импульсного питания электрофильтров // Электричество. – № 9, 1986.– С.21–25.
163. *Чекалов Л.В., Ртищев В.М.* Предельные характеристики импульсного преобразователя для питания электрофильтров на основе разрядника ИРТ-4-1 // Электрические станции, 1989. – № 12. – С.65-67.
164. Патент 2229939 (РФ). Элемент коронирующего электрода электрофильтра / Чекалов Л.В., Гузаев В.А., Курицын Н.А., Санаев Ю.И. – Опубл. В Б.И. – 2004. – № 16.

165. Чекалов Л.В., Ткаченко В.М. Пути интенсификации работы электрофильтров // Электрические станции, 2005. – № 3. – С.51-57.
166. Чекалов Л.В. Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения // ИнформЦемент, 2006. – № 5, – С.67-69.
167. Deutsch W. An. Phys., 1922, p. 68, 335.
168. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981. – С. 442.
169. Pothenier M., Moreau –Henot M. – J. Phys. Et Rad., Series. 7, 3, 590 (1932).
170. Токарев А.В., Лелевкин В. М. , Юданов В. А., Баньшиева А. Особенности электроочистки газа в малых разрядных промежутках // Вестник КРСУ, 2007. – Т. 7. – № 8. – С 107-116.
171. Токарев А.В., Лелевкин В. М. , Юданов В. А. Определение скорости дрейфа заряженных частиц в газодинамическом электрофильтре // Вестник КРСУ, 2008.
172. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Линейный коронный факельный разряд // Сбор. науч. тр. Вып. 3. – Бишкек: КРСУ, 2000. – С. 67-73.
173. Kim K.S., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Синтез озона в линейном коронном факельном разряде из кислорода и воздуха. // Сбор. науч. тр. Вып. 3. – Бишкек: КРСУ, 2000. – С. 8-18.
174. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – С. 207.
175. Токарев А.В., Соколов А.В., Юданов В.А. Линейный коронный факельный разряд в запыленном газе.
176. Патент № 5969 США от 1909 г.
177. Патент № 2305599 России от 2007 г. Вертикальный электрофильтр / Чекалов Л. В., Курицын Н. А., Морозов Ю. М., Санаев Ю. И.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ .....	32
1.1. Типы коронных разрядов .....	7
1.2. Применение коронного разряда .....	15
1.3. Характеристики коронного разряда .....	18
1.4. Электрический ветер и теплообмен в коронном разряде .....	23
2. КОРОННЫЙ РАЗРЯД И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ .....	32
3. ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ .....	38
3.1. Процессы ионизации в земной атмосфере .....	38
3.2. Роль естественной и искусственной ионизации воздуха .....	41
3.3. Естественная аэроионизация .....	42
3.4. Способы создания искусственной ионизации в воздухе .....	48
3.5. Ионизация воздуха коронным разрядом отрицательной полярности .....	50
4. КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НИТРИДА КРЕМНИЯ .....	57
4.1. Использование технологий СВС для получения керамики на основе кремния .....	57
4.2. Создание оптимальных гетерогенных потоков в плазмохимических реакторах .....	61
4.3. Активация порошковых материалов в коронном разряде .....	65
4.4. Проведение СВС в контролируемых условиях .....	71
4.5. Синтез оксид-нитридных керамических материалов из низкоплотного порошка кремния .....	74
5. ЭЛЕКТРООЧИСТКА ГАЗОВ В ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА .....	78
5.1. Физические основы электрической очистки газа в коронном разряде .....	78
5.2. Особенности электроочистки газа в малых разрядных промежутках .....	83
5.3. Дрейф заряженных частиц в газодинамическом электрофилт্রে .....	95

5.4. Линейный коронный факельный разряд в запыленном газе .....	105
5.5. Эффективность очистки газов в коронных разрядах различного типа.....	108
5.6. Газодинамический электрофильтр .....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	119
ЛИТЕРАТУРА.....	124

**А.В. Токарев**

**КОРОННЫЙ РАЗРЯД  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**

Редктор Т.П. Вязьмина  
Компьютерная верстка А. Шелестовой

Подписано в печать 19.11.09.  
Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Печать офсетная.  
Объем 8,75 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 176

Издательство КРСУ  
720000, Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, Бишкек, ул. Горького, 2