

Введение В последнее время устройства, использующие низкотемпературную плазму, интенсивно внедряются в промышленность и в повседневную жизнь. Плазма эффективно используется в нанотехнологиях для создания и модификации наноструктур (например, для обработки материалов с целью повышения срока службы и надежности изделий машиностроения, создания легких и прочных полимерных композиционных материалов, полиэтиленпластиков, получения нанодисперсионных порошков металлов и соединений и т.д.) [1-2]. Высокочастотный емкостный (ВЧЕ) разряд при давлении  $p=13,3 - 133$  Па и межэлектродных расстояниях 20-30 см эффективно применяется для обработки кожевенно-мехового полуфабрикатов [3]. Отличительной особенностью такой обработки является большие размеры образцов (порядка 1 м<sup>2</sup>) и партионность, когда производится обработка одновременно нескольких образцов (партии). Это требует разработки плазмотронов с большими размерами электродов (порядка 0,5x1,4 м<sup>2</sup>) и большим межэлектродным расстоянием (порядка 0,2 - 0,5 м). В настоящее время подробно исследованы модели ВЧЕ разряда среднего и низкого диапазонов давлений при межэлектродных расстояниях  $d = 3-5$  см. Разряд в таких условиях отличается от разряда пониженного давления, так как толщина приэлектродного слоя положительного заряда (СПЗ) много меньше области положительного столба. При небольших межэлектродных расстояниях  $d = 3-5$  см нагрев газа не играет существенной роли в балансе рождения и гибели заряженных и метастабильных частиц в разряде, поэтому, как правило (см., например, [4, стр. 54-60]), математическая модель включает в себя только процессы, описываемые краевыми и начально-краевыми задачами: для электронной и ионной концентраций, уравнения Пуассона. Однако таунсендовский режим ионизации, согласно [5, 6] не учитывает потери энергии на возбуждение атомов и нагрев газа. Кроме того, эта модель неприменима в случае сильных полей, так в этом случае частота ионизации монотонно нарастает с ростом отношения  $E/p$ , тогда как в очень сильных полях ионизационная способность с ростом поля падает. Здесь  $E$  - напряженность электрического поля. Так как энергия первого возбужденного уровня аргона достаточна для того, чтобы через процессы возбуждения и девозбуждения метастабильных атомов, ступенчатой ионизации влиять на нагрев газа и электронную температуру [7-10], то при больших межэлектродных расстояниях потери энергии на нагрев газа являются существенными. Поэтому необходимо при расчете характеристик ВЧ плазмы в таких плазмотронах необходимо рассматривать уравнения нагрева атомов и электронов, баланса метастабильных атомов. Таким образом, необходима разработка математической модели, которая учитывала бы перечисленные выше эффекты при расчете технологических процессов плазменной обработки в плазмотронах с большими межэлектродными расстояниями. Постановка задачи При построении

математической модели предполагается, что плазма состоит из частиц четырех сортов: нейтральные атомы в основном состоянии, возбужденные атомы (метастабилы), электроны и положительные однозарядные ионы. Оценки элементарных процессов в плазме ВЧ разрядов пониженного давления показывают, что длина свободного пробега электронов  $l_e = m$ , толщина дебаевского слоя  $m$ , толщина СПЗ  $h m$  [3]. Таким образом, для описания процессов в ВЧ разряде можно использовать приближение сплошной среды [11]. Изменение электронной температуры электронов может привести к изменению остальных характеристик плазмы, поэтому расчет температуры электронов при постоянном токе и давлении газа в разряде является важной задачей.

Температура электронов в газовом разряде устанавливается самосогласованно и зависит от природы газа, давления и плотности тока. Кроме того при  $d \sim 10$  см и более существенную роль в определении электронной температуры играют нагрев газа и потери энергии на возбуждение метастабильных состояний. Так как массы ионов и метастабилей в одноатомном газе практически совпадают с массой атомов, и при их столкновениях не происходит преобразования кинетической энергии во вращательную или колебательную, то можно считать, что температура ионов совпадает с температурой атомов в основном состоянии. Поэтому уравнения переноса тепла ионами и метастабильными в математической модели можно не рассматривать. В связи с этим, для определения диапазона устойчивого горения ВЧЕ разряда пониженного давления в плазмотроне с большим межэлектродным расстоянием разработана математическая модель, учитывающая перенос энергии электронами, нагрев газа и потери энергии на возбуждение атомов. Математическая модель включает в себя: 1) Уравнения непрерывности для электронного газа: при (1) с граничными условиями, если поле направлено в электрод, (2), если поле направлено от электрода. (3) Здесь – плотность потока электронов, – плотность потока ионов, – концентрации электронов, положительно заряженных ионов и метастабильных атомов, соответственно, – подвижности электронов и ионов, – напряженность электрического поля – коэффициенты диффузии электронов и ионов, – эффективный коэффициент рекомбинации, – частота ионизации, коэффициент вторичной эмиссии, который зависит от материала электрода,  $x$  – пространственная координата, координата  $x = 0$  соответствует заземленному электроду,  $x = d$  – нагруженному,  $t$  – время,  $R_1, R_2$  – скорости ионизации из возбужденного состояния (табл. 1). Таблица 1 - Коэффициенты

Номер q процесса	Коэффициент
1	[8]
2	[8]
3	[8]
4	[7]
5	[9]
6	[7]

Примечание. В табл. 1 – резонансный и метастабильный атомы, положительный ион аргона соответственно,  $e$  – электрон,  $\epsilon$  – энергия испущенного атомом кванта. 2) Уравнения непрерывности для ионного газа: при (4) с граничными условиями, если поле направлено в электрод, (5), если поле направлено от электрода, (6) 3) Уравнения Пуассона для распределения потенциала  $\phi$  электрического поля: (7) с

граничными условиями (8) где  $e$  - заряд электрона, электрическая постоянная,  $\omega$  - круговая частота электромагнитного поля,  $A$  - амплитуда колебания приложенного напряжения; 4) Уравнение теплопроводности атомно-ионного газа: при (9) с граничными условиями (10) Здесь – атомная температура, - температура электрода, – коэффициент теплопроводности атомно-ионного газа, – ионный ток, – постоянная Больцмана, – доля энергии, теряемая электронами в упругих столкновениях с атомами и ионами, – масса электрона, – масса атома аргона, – электронная температура, – эффективная частота столкновений электронов с атомами и ионами, – среднее за период значение. 5) Уравнение для скорости нагрева движущегося электронного газа: при (11) с граничными условиями (12) Здесь – коэффициент электронной теплопроводности, – электронное давление, – электронная скорость дрейфа,  $I=15,76$  эВ – потенциал ионизации, - температура на поверхности электродов, эВ – энергия возбуждения первого уровня, – субстанциональная производная; 6) уравнение баланса метастабильных атомов: при (13) с граничными условиями (14) Здесь – коэффициент диффузии метастабильных атомов,  $N$  – концентрация нейтральных атомов, рассчитываемая из условия, коэффициенты  $R_q$ ,  $q=1,\dots,6$  – скорости соответствующих процессов (табл.1). В качестве начальных условия для перечисленных задач выбирались постоянные значения (15) В достаточно сильно ионизированной плазме, при максвелловской функции распределения электронов по энергиям частоту ионизации в плазме аргона можно аппроксимировать функцией вида [4]: Здесь – средняя тепловая скорость, - константа, характеризующая наклон сечения ионизации у порога [12, стр. 59]. В диапазоне энергий электронов, где происходят неупругие столкновения, спектр значительно обедняется по сравнению с максвелловским распределением, и фактически частота ионизации значительно меньше [13] где  $\nu$ . В коэффициенте рекомбинации необходимо учесть процессы фоторекомбинации и тройной ударно- радиационной рекомбинации [12] Здесь в электрон-вольтах. Остальные транспортные коэффициенты аппроксимировались зависимостями [12]  $\dots$ , [6], [12], [14, С. 21]. Численный метод и результаты решения Построенная модель характеризуется большим количеством специфических особенностей: 1) наличием областей медленного и быстрого изменения решения, как по пространству, так и во времени; 2) сильной нелинейностью; 3) наличием уравнений разного типа ( параболических и эллиптических, с параметрической зависимостью от времени). Поэтому численные методы решения задачи должны ставиться с учетом этих особенностей. Для численного решения системы использовалась неявная разностная схема на равномерной сетке. Оператор конвективного переноса аппроксимировался направленными разностями. Разностная схема строилась интегро-интерполяционным методом [15], что обеспечило консервативность разностной схемы. Нелинейная система начальных и начально-краевых задач (1)-(15) решалась итерационным методом

со сносом нелинейности на предыдущий слой. При этом для линейризации нелинейных членов в уравнениях (11) и (13) применялся метод Ньютона. Результаты тестовых расчетов ВЧЕ разряда в плазмотроне с межэлектродным расстоянием 22 мм, при давлении  $p=13,3$  Па, амплитуде приложенного напряжения  $V_a=25$  В, показали что концентрация метастабильных атомов достигает максимума в области квазинейтральной плазмы. Температура электронов имеет два локальных максимума в приэлектродных областях (рис. 1). Максимальные значения электронной температуры 2,85 эВ, в области квазинейтральной плазмы минимальное значение 1,89 эВ, при этом температура газа остается практически постоянной 305 К. Рис. 1 - Распределение средней за период электронной температуры в межэлектродном пространстве

Концентрация электронов имеет характерную колоколообразную форму с максимумом в центре разряда (рис. 2). Рис. 2 - Распределение концентрации электронов в различные моменты времени: сплошная кривая соответствует моменту времени  $t$ , пунктирная –  $t + \Delta t$ , штрих-пунктирная –  $t + 2\Delta t$  В межэлектродном промежутке значения полной плотности тока в каждый момент времени остаются постоянными, но во времени испытывают практически гармонические колебания (рис. 3) Рис. 3 - Колебания значений полного тока в течение периода

Результаты расчета качественно совпадают с данными авторов [16].

Количественные отличия по величине потенциала электрического поля и концентрации метастабильных частиц связаны с учетом в модели, рассматриваемой в настоящей работе, неоднородного распределения газовой температуры. Предложенная модель актуальна и в случае небольших межэлектродных расстояниях, так как позволяет провести более точные расчеты и в случае плазмообразующих устройств с небольшими межэлектродными расстояниями с различной степенью приближения: а) при отсутствии физической диффузии – система (1)-(8) при ; б) без учета нагрева электронного и атомно-ионного газов (классическая диффузионно-дрейфовая модель) – система (1)-(8) при ; в) с учетом изменяющихся по пространственной переменной электронной и газовой температур в пренебрежении влиянием метастабильных атомов – система (1)-(15) при ; г) с учетом процессов нагрева газа и образования возбужденных атомов, процессов ударной и ступенчатой ионизации система (1)-(15) со всеми ненулевыми коэффициентами. Выводы

Таким образом, в результате анализа математических моделей высокочастотного емкостного разряда пониженного давления в классической постановке (учитывающей потенциал электрического поля, концентрацию электронов и ионов) и с учетом переноса энергии электронами и нагрева нейтральных атомов установлено, что они не дают адекватного описания состояния плазмы в плазмотроне с большим межэлектродным расстоянием. В связи с этим построена математическая модель высокочастотного емкостного разряда пониженного давления, в которой, в отличие от предложенных ранее,

учитываются процессы ступенчатой ионизации, передачи энергии от электронов атомам в основном и возбужденном (метастабильном) состояниях, а также влияние метастабильных атомов на распределения заряженных частиц и электронной температуры, поскольку изменение последней оказывает существенное влияние на остальные характеристики плазмы. Описанная система краевых задач позволяет провести расчеты параметров ВЧ разряда пониженного давления с различной степенью приближения: а) отсутствию физической диффузии; б) классическая диффузионно-дрейфовая модель без учета нагрева электронного и атомно-ионного газов; в) неоднородное пространственные газовой и электронной температуры; г) с учетом процессов нагрева газа и образования возбужденных атомов, ударной и ступенчатой ионизации.