**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОЙ ВЧ-ПЛАЗМЫ с учетом метастабильных атомов**

В.С. Желтухин1, А.Ю. Шемахин2

1Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань,  
 Россия, [vzheltukhin@gmail.com](mailto:vzheltukhin@gmail.com)  
2Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,  
 [shemakhin@gmail.com](mailto:shemakhin@gmail.com)

Плазма высокочастотных (ВЧ) разрядов пониженного давления (р = 13.3 - 133 Па) с продувом газа эффективно используется для модификации поверхностей материалов органической и неорганической природы [1]. Плазма, создаваемая данного типа разрядом, имеет следующие свойства: степень ионизации 10-4 -10-7, концентрация электронов 1015 - 1019 м-3 , температура электронов 1 - 4 эВ , температура атомов и ионов в сгустке (3 - 4) • 103 К, в плазменной струе (3.2 - 10) • 102 К.

Течение ВЧ-плазмы пониженного давления осуществляется в переходном режиме, число Кнудсена Kn для заряженных частиц 5 • 10-4 < Kn < 5 • 10-3, для нейтрального газа 8 • 10-3 < Kn < 7 • 10-2. Это означает, что течение нейтральной компоненты находится в переходном режиме между потоком в режиме сплошной среды и свободномолекулярным потоком, а для заряженной компоненты применимо приближение сплошной среды [2]. Особенностью течения является так же и тот факт, что концентрация метастабильных атомов для данного типа плазмы может достигать значений концентрации электронов.

Математическая модель состоит из уравнения Больцмана для нейтральной компоненты, уравнений неразрывности и сохранения энергии для заряженной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления, уравнения неразрывности для метастабильных атомов, начальных и граничных условий.

Программный комплекс для расчета потока ВЧ-плазмы пониженного давления разработан с помощью языка С++. Расчет проводился для модели вакуумной камере радиусом R = 0,2 м, радиусом входного отверстия R = 0,012 м и длиной камеры L = 0,5 м.

Через входное отверстие вакуумной камеры втекает поток плазмы (рабочий газ - аргон) с давлением на входе в диапазоне от Pinlet = 75 - 135 Па, температурой T на входе = 400 - 600 К, скоростью потока Vinlet = 700 - 1000 м/с и температурой электронов Те = 1 - 2 эВ. Расход газа G ∽ 0,12 - 0,24 г/с. Степень ионизации в камере δn = 10-4 - 10-7, начальное давление в камере P0 = 7,5 - 13,5 Па

Проведены расчеты невозмущенного потока ВЧ-плазмы пониженного давления. Получены распределения модуля скорости, давления и температуры несущего газа, распределение концентрации и температуры электронов, распределение концентрации метастабильных атомов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60081 и № 15-41-02672.

Список литературы

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин B.C., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. Казань: Изд-во Казан, гос. технол. ун-та, 2007. - 356 с.
2. V. S. Zheltukhin, A. Yu. Shemakhin. Simulation of RF plasma flowing at low pressure // Mathematical Models and Computer Simulations, 2014, Volume 6, Issue 1, pp 101-107