МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ

В.С. Желтухин, \*А.Ю. Шемахин

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань,  
 Россия, [vzheltukhin@gmail.com](mailto:vzheltukhin@gmail.com)  
\*Казанский (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, для которого не существует устоявшихся моделей, таких как уравнения Навье-Стокса для режима сплошной среды.

Анализ и оценка характерных масштабов элементарных процессов в плазме показали, что поток ВЧ-плазмы пониженного давления имеет специфические особенности, а именно: 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.

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

Программный комплекс для расчета потока ВЧ-плазмы пониженного давления разработан с использованием библиотек пакета OpenFOAM (DSMC, FVM). Расчет проводился для модели вакуумной камере радиусом R = 0,1 - 0,3 м , радиусом входного отверстия R = 0,012 - 0,024 м и длиной камеры L = 0,3 - 0,5 м . Цилиндрический образец имеет размеры Rb = 0,01 - 0,05 м, Lb = 0,02 - 0,05 м и расположен по центру струи на расстоянии Ltb = 0,03 - 0,3 м от входного отверстия перпендикулярно направлению потока.

Через входное отверстие вакуумной камеры втекает поток плазмы (рабочий газ - аргон) с давлением на входе в диапазоне от Pinlet = 35 - 155 Па, температурой T на входе = 400 - 600 К, скоростью потока Vinlet = 700 - 1000 м/с и температурой электронов Те = 1 - 4 эВ. Расход газа G ∽ 0,12 - 0,24 г/с. Степень ионизации в камере δn = 10-4 - 10-7, начальное давление в камере P0 = 3,5 - 15,5 Па

Проведены расчеты невозмущенного потока ВЧ-плазмы пониженного давления и потока при наличии образца в струе. Представлены распределения модуля скорости, давления и температуры несущего газа, распределение концентрации и температуры электронов. Расчеты показали, что время установления течения в этих условиях составило порядка 10-2 с.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, исследовательские проект № 14-01-00728а и 14-01-00755а.

Литература

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.