

УДК 629.78:621.368

Модифицированная магнитогидродинамическая модель расчета динамики заряженных частиц в разреженной плазме электрореактивных двигателей

Гордеев Святослав Валерьевич^(*)

svyatoslavgordeev@mail.ru

Канев Степан Васильевич

k208mai@mail.ru

Московский авиационный институт, Москва, Россия

Аннотация. В докладе представлена численная методика моделирования концентрации заряженных частиц в разреженной низкотемпературной плазме. Методика основана на модификации магнитогидродинамической модели расчета концентрации заряженных частиц, которая в случае разреженной плазмы может обладать достаточно высокой погрешностью, возникающей при осреднении квадрата скорости частиц. Проводилась серия тестовых расчетов и сравнение предложенной методики и классического магнитогидродинамического подхода с опубликованным аналитическим решением для плазмы в сферической расчетной области. Получена более высокая точность разработанной методики.

Ключевые слова: разреженная низкотемпературная плазма, магнитогидродинамическая модель, аналитическое решение уравнения потенциала, электрореактивный двигатель, газовый разряд

Введение. Для проектирования и оптимизации различных электрореактивных двигателей требуется проводить математическое моделирование поддерживаемых в них газовых разрядов низкого давления. На сегодняшний день предложено значительное количество подходов и методов моделирования таких разрядов. Все существующие математические модели можно разделить на три основные группы: нульмерные модели, основанные на уравнениях баланса массы, импульса и энергии в расчетной области, одно-, двух- и трехмерные магнитогидродинамические модели, основанные на представлении компонент плазмы, как электропроводных жидкостей, и кинетические модели, основанные на решении кинетических уравнений Больцмана или на моделировании динамики отдельных частиц (различные методы крупных частиц).

Магнитогидродинамические (МГД) модели [1-3] позволяют получать и анализировать распределения параметров плазмы в расчетной области и, при этом, обладают во многих случаях приемлемыми требованиями к вычислительным ресурсам. Однако применительно к разрядам низкого давления, характеризующимся анизотропией потоков заряженных частиц, магнитогидродинамические уравнения в классическом виде не могут использоваться без возникновения локальных погрешностей расчета в областях, где наиболее сильно проявляется неравномерность скоростей потоков заряженных частиц по величине и направлению. В докладе представлена методика, позволяющая

доработать МГД приближение применительно к разреженной плазме и таким образом расширить применение данного подхода.

Материалы и методы, результаты. Магнитогидродинамическое приближение для описания динамики ионов точно описывает происходящие процессы, поскольку основано на законах сохранения. При этом, в уравнении сохранения количества движения фигурирует среднеквадратичная скорость:

$$\overline{v^2} \neq (\bar{v})^2, \quad (1)$$

где $\bar{v} = \int_0^\infty f v dv$ — средняя скорость частиц в рассматриваемой точке, $\overline{v^2} = \int_0^\infty f v^2 dv$ — среднеквадратичная скорость частиц в рассматриваемой точке f — нормированная функция распределения частиц по скоростям в рассматриваемой точке, зависящая в трехмерном случае от шести переменных — x, y, z, v_x, v_y, v_z .

Применительно к плотной среде выполнение неравенства (1) приводит к появлению дополнительного слагаемого в уравнениях сохранения количества движения, связанного с давлением среды. В разреженных средах такой подход не применим вследствие анизотропии поля скоростей в рассматриваемой точке. Решив данную проблему, возможно создать МГД модель применимую к расчету разреженных сред.

Был введен коэффициент, учитывающий отношение среднего квадрата скорости к квадрату средней скорости ионов. Методика предполагает расчет распределения данного коэффициента рассматриваемой области. Учет рассматриваемого коэффициента в уравнениях количества движения позволяет уточнить результаты применения магнитогидродинамического подхода при расчетах разреженной плазмы.

Для проверки корректности разработанной методики проводилась серия тестовых расчетов и сравнение предложенной методики и классического магнитогидродинамического подхода с опубликованным аналитическим решением для плазмы в сферической расчетной области при равномерном ионообразовании. Получена более высокая точность разработанной методики. Разработанная методика может быть использована при моделировании работы источников плазмы и электрореактивных двигателей.

Заключение. В докладе представлена расчетная методика, позволяющая применять магнитогидродинамический подход к расчету разреженной плазмы. Проведенная серия тестовых расчетов при сравнении с аналитическим решением для сферической расчетной области показала более высокую точность разработанной методики по сравнению с классическим МГД подходом.

Список источников

- [1] Closs M. RF Ion Thruster Design Software Based on Numerical Modeling. *ESASP-465. 3rd Spacecraft Propulsion*. Cannes, France, 2001, 419 p.
- [2] Celik M., Turkoz E. 2-D electromagnetic and fluid models for inductively coupled plasma for RF ion thruster performance evaluation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 235–240.
- [3] Heiliger C., Henrich R. Three Dimensional Simulation of Micro Newton RITs. *Proceedings of the thirty-third international electric propulsion conference, Electric Rocket Propulsion Society*. Washington DC, USA, 2013.