

В.В. КРЮЧЕНКОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ ПЛАЗМЫ В СТАЦИОНАРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Работа является продолжением, с одной стороны, работ А. И. Морозова и В. В. Савельева 2000 г., в которых рассматриваются простейшие модели стационарных плазменных двигателей, и с другой – серии работ под руководством К. В. Брушлинского по исследованию устойчивости плазменных конфигураций в современной плазменной технике. В качестве равновесных конфигураций были взяты стационарные решения одномерной гидродинамической модели. Получены результаты о динамике во времени малых одно-, дву- и трёхмерных возмущений, и определена область размерных параметров задачи, в которой возмущения затухают, то есть стационарное решение оказывается устойчивым.

V.V. KRIUCENKOV¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

STABILITY OF PLASMA FLOWS IN A STATIONARY PLASMA THRUSTER

This work is a continuation of the papers by A. I. Morozov and V. V. Savelyev from 2000, which considered the simplest models of stationary plasma thrusters, and a series of studies the group led by K. V. Brushlinskii on the stability of plasma configurations in modern plasma technology. Stationary solutions of a one-dimensional hydrodynamic model were used as equilibrium configurations. Results on the temporal dynamics of small one-, two-, and three-dimensional perturbations were obtained. The range of dimensional parameters where the perturbations decay – meaning the stationary solution is stable – was determined.

Стационарные плазменные двигатели (СПД), предложенные Алексеем Ивановичем Морозовым, успешно используются в космической программе уже более 50 лет. Типичный двигатель представляет собой канал кольцевого сечения, на входе которого расположен анод, а на выходе – катод. С анода подаётся нейтральный газ и впоследствии ионизуется внутри канала, соударяясь с дрейфующими в азимутальном направлении электронами. Ионы, образованные таким образом, ускоряются вдоль канала электрическим полем [1]. Основные принципы работы двигателей хорошо изучены экспериментально, и тем не менее теоретическое исследование представляется неполным и затруднительным в связи со сложностью протекающих в них физических процессов [2]. Одним из основных вопросов, возникающих при разработке теории как стационарных плазменных двигателей, так и современной плазменной техники в целом, является вопрос об устойчивости конфигураций плазмы [3].

Эта работа продолжает разработку математических моделей СПД, начатую А. И. Морозовым и В. В. Савельевым. За основу взята работа вышеуказанных авторов [4], в которой поставлена и решена для простейших случаев одномерная гидродинамическая модель. В этой постановке существует решение стационарной краевой задачи. Полученные таким образом конфигурации восстанавливаются в решениях уже нестационарной задачи при определённых ограничениях на размерные параметры. Здесь используются известные методы исследования устойчивости посредством изучения динамики малых возмущений. В этом смысле работа является продолжением цикла работ по устойчивости равновесных конфигураций плазмы в магнитных ловушках, проведённых под руководством К. В. Брушлинского [5].

Для решений стационарной задачи одномерной гидродинамической модели вводятся одномерные малые возмущения с последующей линеаризацией относительно них системы уравнений. Рассматривается развитие возмущений со временем. Колебаясь, они либо затухают, что означает устойчивость, либо экспоненциально растут, что означает неустойчивость по Ляпунову. В результате были определены граничные значения размерных параметров задачи, которые совпали с ограничениями, полученными для нелинейной нестационарной задачи, что естественно для одномерных возмущений. Далее вводятся дву- и трёхмерные возмущения в виде Фурье-гармоник, поскольку невозмущённая задача является одномерной. Увеличение размерности не привело к качественному изменению результатов, то есть границы устойчивости остались теми же, а скорость затухания возмущений оказалась инвариантна относительно номера гармоники. Тем не менее номер гармоники влияет на амплитуду колебаний возмущений: чем выше её порядок, тем больше амплитуда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-71-20018).

Список литературы

1. Морозов А.И. Разработка идеологии стационарных плазменных двигателей // Физика плазмы. 2003. Т. 29, № 3. С. 261–276.
2. Morozov A.I., Savelyev V.V. Fundamentals of stationary plasma thruster theory // Reviews of Plasma Physics / ed. by V.B. Kadomtsev and V.D. Shafranov. Vol. 21. N.Y.: Consultants Bureau, 2000. P. 203–391.
3. Ким В.П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, вып. 3. С. 45–59.
4. Морозов А.И., Савельев В.В. Одномерная гидродинамическая модель динамики атомов и ионов в стационарном плазменном двигателе (СПД) // Физика плазмы. 2000. Т. 26, № 3. С. 238–243.
5. Брушлинский К.В., Крючков В.В., Стёпин Е.В. Об устойчивости строгого равновесия плазмы в двумерных математических моделях магнитных ловушек // Докл. РАН. Матем., информ., проц. упр. 2024. Т. 519. С. 3–6.