

## РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ В ОСЕНЕСИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ <sup>\*)</sup>

Сорокина Е.А.

НИИ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, [Sorokina\\_EA@nrcki.ru](mailto:Sorokina_EA@nrcki.ru)

Обсуждается фундаментальная проблема равновесия плазмы в осенесимметричной магнитной конфигурации. В отличие от идеализированного случая осевой симметрии, описываемого каноническим уравнением Грэда-Шафранова, имеющего различные типы решений, в том числе аналитические и численные примеры равновесных систем с тороидально вложенными магнитными поверхностями, существование таких систем в отсутствие симметрии не только не является очевидным, но и подвергается постоянным сомнениям на протяжении уже более 60 лет развития теории равновесия плазмы.

В реальности симметричных магнитных систем нет. В токамаках неизбежна асимметрия из-за дискретности магнитных катушек, наличия нагревных и диагностических портов, внешних полей. Теория возмущений исходно симметричных конфигураций наталкивается на нарушение необходимого условия равновесия – постоянства приведённых длин силовых линий на рациональных магнитных поверхностях [1]. Формально это проявляется в появлении резонансных знаменателей в магнитном дифференциальном уравнении [2, 3], описывающем замыкание токов, что означает наличие на рациональных поверхностях сингулярных токов (см., например, [4]). Это интерпретируется как неизбежное нарушение вложенности магнитных поверхностей и образование островной структуры [1].

Не решает проблему и компьютерное моделирование. Современные 3D численные коды либо допускают наличие в области рациональных магнитных поверхностей сингулярных токовых слоёв, либо обходят в расчётах эту область, искусственно вводя «полочки» на профилях давления плазмы, вращательного преобразования или их комбинации. И хотя математического запрета на выполнение условия замыкания токов на рациональных магнитных поверхностях нет, но в рамках стандартных упрощённых моделей с геометрией плоского слоя или цилиндра решений построить не удаётся [5]. Отсутствие наглядных гладких решений, не обладающих пространственной симметрией, в течение многих лет служило аргументом в поддержку гипотезы Грэда о несуществовании невырожденных трёхмерных равновесий плазмы со вложенными магнитными поверхностями [6].

В настоящей работе предъявлен класс аналитических решений уравнений равновесия с истинными магнитными поверхностями, удовлетворяющими условию замыкания токов. Использована удобная система уравнений равновесия [7], обобщающая подход Грэда-Шафранова на случай осенесимметричных магнитных конфигураций. Выявлена и наглядно продемонстрирована неприменимость простой модели кругового цилиндра с отождествлёнными концами для предсказательных выводов о равновесии плазмы тороидальной топологии. Развитый формализм доказывает ошибочность гипотезы Грэда и открывает возможности для адекватного моделирования трёхмерных равновесных плазменных конфигураций.

### Литература

- [1]. Л.С. Соловьёв, В.Д. Шафранов. В сб. Вопросы теории плазмы, вып. 5, 3-208, 1967.
- [2]. M.D. Kruskal, R.M. Kulsrud // Phys. Fluids. 1, 265, 1958.
- [3]. W. Newcomb // Phys. Fluids. 2, 362, 1959.
- [4]. Y.-M. Huang et al. // PPCF, 65, 034008, 2023.
- [5]. J. Loizu et al. // Phys. Plasmas. 22, 022501; 090704, 2015.
- [6]. H. Grad. Int. J. Fus. En. 3, 33, 1985.
- [7]. Е.А. Сорокина, В.И. Ильгисонис // Физика плазмы. 45, 1065, 2019.

<sup>\*)</sup> [DOI – тезисы на английском](#)