Виталий Дмитриевич Шафранов и развитие трёхмерных тороидальных систем для удержания плазмы

М.И. Михайлов

НИЦ «Курчатовский институт», mikhaylov\_mi@nrcki.ru

Академик В.Д. Шафранов, 90-летие которого отмечалось 1 декабря 2019 года, внёс огромный вклад в теоретические исследования физики равновесия и устойчивости удерживаемой в магнитном поле тороидальной плазмы (Альфвеновская премия 2001 года). Наиболее известны его результаты для токамаков. Достаточно назвать, например, уравнение равновесия Грэда-Шафранова, смещение Шафранова, критерий устойчивости Крускала-Шафранова. Наряду с токамаками, В.Д. Шафранов занимался и более сложными трёхмерными тороидальными системами, в частности – стеллараторами. В докладе приводится краткий обзор основных работ В.Д. Шафранова в этой области.

Первые печатные работы В. Д. Шафранова по трёхмерным системам относятся к началу 60-ых годов (работы в журнале «Атомная энергия»). Широко известны его статьи во втором и пятом выпусках «Вопросов теории плазмы» (разложение по степеням расстояния от магнитной оси, аналогия поведения силовых линий и скорости движения несжимаемой жидкости). В конце 60-ых в цикле работ (часть – в соавторстве с Э.И. Юрченко) была предложена формулировка уравнений равновесия, при которой использовались и ко- и контравариантные представления вектора магнитного поля, так что система уравнений равновесия сводилась почти полностью к идентичности этих представлений.

Работы В. Д. Шафранова проясняли и отдельные важные вопросы. Сюда можно отнести работу 1971 года о магнитной яме, работу 1972 года (совместно с Л.Е. Захаровым) о виртуальном кожухе, работу 1976 года (совместно сДж.В. Коннором и Х. Ватсоном), обобщающую выражение для скорости диффузии на трёхмерные системы.

В 1981 году В. М. Глаголевым, Б.Б. Кадомцевым, Б.А. Трубниковым и В.Д. Шафрановым был предложен способ существенного уменьшения вторичных токов за счёт создания прямолинейных участков тороидального плазменного шнура, вообще свободных от них, что обеспечивается специальными замыкателями (КРЭЛами).

В 90-ые годы В. Д. Шафранов с учениками приложил немало усилий для развития нового направления оптимизированных стеллараторов, в том числе организовав плодотворное международное сотрудничество. Как результат, были найдены равновесные конфигурации, обладающие хорошим удержанием частиц, малыми неоклассическими переносами, малым бутстрэп-током, малыми вторичными токами (период такой системы является КРЭЛом) и достаточно большим предельным по МГД устойчивости давлением плазмы. Если будет продемонстрирована возможность создания соответствующих внешних полей технически приемлемым способом, можно будет говорить о стеллараторе, как о стационарной бестоковой тороидальной магнитной ловушке для удержания плазмы.