Изучение электронной теплопроводности плазмы в расширителе магнитной ловушки открытого типа

Е.И. Солдаткина1,2, П.А. Багрянский1,2, М.С. Коржавина1,2, В.В. Максимов1,2, В.В. Приходько1,2, В.Я. Савкин1,2

1Институт ядерной физики им. Г.И. Будкеpа, г. Новосибирск, Россия,   
 [E.I.Soldatkina@inp.nsk.su](mailto:E.I.Soldatkina@inp.nsk.su)  
2Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Характерной особенностью большинства открытых систем является наличие устройства для расширения потока плазмы, вытекающей из ловушки. Использование такого магнитного сопла (расширителя) позволяет решить ряд физико-технических задач: снизить тепловые нагрузки на торцевую стенку, осуществить непосредственную рекуперацию энергию плазмы в электрическую и так далее. Кроме того, как показано в ряде теоретических работ, расширяющееся магнитное поле способно также подавлять электронный поток тепла между центральной частью ловушки и плазмоприёмником. К сожалению, нынешние модели плазмы в расширителе кажутся слишком упрощёнными и не могут быть применены к режимам, соответствующим крупным установкам типа нейтронного источника. В частности, требуется дальнейшее развитие электронной кинетической теории, а так же учёт баланса и динамики нейтрального газа. Физика расширителя ГДЛ изучалась экспериментально, однако при гораздо более низких параметрах плазмы, чем сегодняшние [1]. Таким образом, уточнение физики продольного удержания электронов в открытой ловушке является важным с точки зрения будущих приложений.

В недавних экспериментах на установке ГДЛ для подавления поперечных потерь плазмы, возникающих при развитии МГД неустойчивостей, был использован достаточно хорошо обоснованный теоретически и экспериментально метод вихревого удержания [2]. Этот метод позволил достичь рекордных для осесимметричных пробкотронов значений относительного давления плазмы *β* = 0,6. Также в ходе последних экспериментов с дополнительным нагревом плазмы микроволновым излучением на электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) удалось получить электронную температуру, превышающую 0,6 кэВ, что является на сегодняшний день рекордом для осесимметричных открытых магнитных ловушек [3]. Эти достижения выводят на конкурентоспособный уровень проекты нейтронных источников на основе осесимметричных пробкотронов – их ближайшего реакторного приложения. Таким образом, появляется возможность прямой экспериментальной проверки таких проектов с тем, чтобы экстраполировать полученные результаты для термоядерных реакторов будущего.

Для реализации поставленных задач проведен цикл экспериментальных работ на установке ГДЛ. Проведено измерение электрического потенциала, средней энергии и плотности электронов в расширителе как функций координаты вдоль магнитной силовой линии при высокой температуре электронов в центре ловушки. Определена минимальная степень расширения, необходимая для подавления электронной теплопроводности из открытой ловушки. Степень расширения изменялась при помощи подвижной центральной части торцевой стенки. Следует отметить, что физика расширителя для разных вариантов открытых ловушек представляется довольно схожей, поэтому проведенные исследования, выполненные на ГДЛ, могут быть полезны для широкого круга проектов.

Литература

1. A.V. Anikeev, et al. Plasma Phys. Rep. 25, 10, 775-782, 1999;
2. A.D. Beklemishev, et al. Fusion Science and Technology, v.57, p 351 (2009);
3. P.A. Bagryansky et al., Phys. Rev. Lett. 114, 205001 (2015).Список авторов
4. Солдаткина Елена Ивановна, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [E.I.Soldatkina@inp.nsk.su](mailto:E.I.Soldatkina@inp.nsk.su)
5. Багрянский Петр Андреевич, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [P.A.Bagryansky@inp.nsk.su](mailto:P.A.Bagryansky@inp.nsk.su)
6. Коржавина Мария Сергеевна, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [M.S.Korzhavina@inp.nsk.su](mailto:M.S.Korzhavina@inp.nsk.su)
7. Максимов Владимир Васильевич, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [V.V.Maximov@inp.nsk.su](mailto:V.V.Maximov@inp.nsk.su)
8. Приходько Вадим Вадимович, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [V.V.Prikhodko@inp.nsk.su](mailto:V.V.Prikhodko@inp.nsk.su)
9. Савкин Валерий Яковлевич, РФ, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, [V.Ya.Savkin@inp.nsk.su](mailto:V.Ya.Savkin@inp.nsk.su)

study of plasma electron thermal conductivity   
in the magnetic mirror

E.I. Soldatkina1,2, P.A. Bagryansky1,2, M.S. Korzhavina1,2, V.V. Maksimov1,2, V.V. Prikhodko1,2, and V.Ya. Savkin1,2

1Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia, [E.I.Soldatkina@inp.nsk.su](mailto:E.I.Soldatkina@inp.nsk.su)  
2Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Most part of open magnetic systems has the device for the expansion of the plasma stream flowing out of the trap. Using of such a magnetic nozzle (expander) allows solving a series of physical and technical challenges: to reduce the thermal load on the end wall, to carry out direct recuperation of plasma energy into electricity, and so on. In addition, as shown in a number of theoretical studies, expanding magnetic field can also suppress the electron heat flow between the central part of the trap and plasma absorber. Unfortunately, the current models of plasma in the expander seem to be oversimplified and cannot be applied to a modes corresponding to large devices such as the neutron source or fusion reactor. In particular, it requires further development of the electron kinetic theory, as well as the account of balance and the dynamics of neutral gas. GDT expander physics studied experimentally earlier, but at much lower plasma parameters than today’s [1]. Thus, more precise investigations of electron longitudinal confinement physics in an open trap is important in terms of future applications.

In recent experiments on the GDT well-studied method of vortex confinement had been used to suppress the transverse plasma losses arising by the MHD instabilities development [2]. This method allowed to reach the relative pressure of plasma *β* = 0.6 which is record value for axisymmetric mirrors as well as an electron temperature exceeding of 0.6 keV. Such temperature has been achieved in recent experiments with additional plasma heating by microwave radiation on the electron cyclotron resonance (ECR) [3]. These advances bring the neutron sources projects based on axisymmetric mirrors to the competitive level. Thus, there is a possibility of direct experimental verification of such projects in order to extrapolate the results for future fusion reactors.

For realization of mentioned tasks a series of experiments were carried out on the GDT device. Measurements of potential, the average energy of the electrons and its density in the expander as a function of position along the magnetic field line at high electron temperature in the center of the trap was carried out. The minimum degree of expansion which is necessary for the electron heat conductivity suppression from the open trap was defined. The expansion ratio was varied using a movable central section of the end wall. It should be noted that the physics of the expander for the different types of open traps is quite similar, so the studies carried out on GDT can be useful for a wide range of other projects.

References

1. A.V. Anikeev, et al. Plasma Phys. Rep. 25, 10, 775-782, 1999;
2. A.D. Beklemishev, et al. Fusion Science and Technology, v.57, p 351 (2009);
3. P.A. Bagryansky et al., Phys. Rev. Lett. 114, 205001 (2015).**List of authors**
4. Soldatkina Elena Ivanovna, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [E.I.Soldatkina@inp.nsk.su](mailto:E.I.Soldatkina@inp.nsk.su)
5. Bagryansky Petr Andreevich, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [P.A.Bagryansky@inp.nsk.su](mailto:P.A.Bagryansky@inp.nsk.su)
6. Korzhavina Maria Sergeevna, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [M.S.Korzhavina@inp.nsk.su](mailto:M.S.Korzhavina@inp.nsk.su)
7. Maximov Vladimir Vasilievich, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [V.V.Maximov@inp.nsk.su](mailto:V.V.Maximov@inp.nsk.su)
8. Prikhodko Vadim Vadimovich, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [V.V.Prikhodko@inp.nsk.su](mailto:V.V.Prikhodko@inp.nsk.su)
9. Savkin Valery Yakovlevich, RF, Novosibirsk, BINP SB RAS, [V.Ya.Savkin@inp.nsk.su](mailto:V.Ya.Savkin@inp.nsk.su)