

Научная статья

УДК 533.9

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-5-13

Измерение потерь энергии на лимитере газодинамической ловушки

Андрей Константинович Мейстер¹,
Елена Ивановна Солдаткина²,
Дмитрий Вадимович Яковлев³

¹⁻³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

^{1,2}Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹A.K.Meyster@inp.nsk.su

²E.I.Soldatkina@inp.nsk.su

³D.V.Yakovlev@inp.nsk.su

Аннотация

В газодинамической ловушке (ГДЛ) – открытой магнитной ловушке для удержания плазмы – наблюдается несоответствие между энергией, введенной в плазму, и энергией, измеренной по известным каналам потерь: при захвате плазмой 2–3 МВт мощности от нейтральных пучков потери энергии не превышают сотен киловатт. В данной работе было исследовано предположение о потере части энергии на лимитерах установки, основанное на численном моделировании, которое предсказывает пикированный вблизи лимитера профиль мощности, выделяющейся в плазме при остывании быстрых ионов. Экспериментальные результаты показали, что потери на лимитере слишком малы, чтобы объяснить расхождение энергобаланса, и необходимы дальнейшие поиски канала крупных потерь.

Ключевые слова

плазма, открытые ловушки, потери энергии, лимитер

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования

Мейстер А. К., Солдаткина Е. И., Яковлев Д. В. Измерение потерь энергии на лимитере газодинамической ловушки // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 5–13. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-5-13

Energy Loss Measurements on the Limiter of the Gas Dynamic Trap

Andrey K. Meyster^{1,2}, Elena I. Soldatkina^{1,2},
Dmitriy V. Yakovlev¹

¹⁻³*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia*

¹⁻²*Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia*

¹A.K.Meyster@inp.nsk.su

²E.I.Soldatkina@inp.nsk.su

³D.V.Yakovlev@inp.nsk.su

Abstract

A discrepancy between the energy input into the plasma and the energy lost through the measured loss channels is observed in the Gas Dynamic Trap (GDT): while 2-3 megawatts of power are captured by the plasma from the neutral beams, the observed energy losses do not exceed hundreds of kilowatts. In this study, a proposal was investigated that a part of the input energy is lost on the limiters of the GDT. The proposal was based on numerical modelling results that predict an existence near the limiter of a peak of power transferred to the plasma via fast ion drag. The experimental results showed that the energy losses on the limiter are too small to explain the energy balance discrepancy and further investigations of large loss channels are required.

Keywords

plasma, magnetic mirror devices, energy losses, limiter

Funding

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation

Meyster A. K., Soldatkina E. I., Yakovlev D. V., Meyster A. K., Soldatkina E. I., Yakovlev D. V. Energy Loss Measurements on the Limiter of the Gas Dynamic Trap. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 5–13. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-5-13

Открытые магнитные ловушки являются одним из перспективных направлений в исследованиях термоядерного синтеза. На основе таких ловушек потенциально возможно создание источников быстрых нейтронов и термоядерных реакторов, отличающихся от других типов магнитных установок (к примеру, токамаков и стеллараторов) значительно большей простотой конструкции. Дополнительным преимуществом открытых ловушек является возможность удерживать плазму при более высоких значениях параметра β – отношения кинетического давления плазмы к давлению магнитного поля установки [1], а значит возможно максимально эффективное использование магнитного поля. В совокупности эти факторы снижают стоимость производства и эксплуатации данного типа реакторов.

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) является одним из вариантов таких открытых магнитных систем для удержания плазмы. Центральной частью газодинамической ловушки (рис. 1) является соленоид длиной 7 м с магнитным полем внутри до 0,35 Тл, на концах которого расположены магнитные пробки с величиной поля до 12 Тл. «Мишенная» плазма создается дуговым разрядом плазменной пушки в «восточной» части установки и нагревается восемью пучками нейтральных атомов с энергией 25 кэВ. В результате резонансной перезарядки инжектированных атомов в плазме образуется популяция «быстрых» ионов, которые передают свою энергию «мишенной» плазме в кулоновских столкновениях и нагревают ее до температуры 200 эВ.

В установке ГДЛ наблюдается заметное расхождение в балансе энергии. Нейтральными пучками в плазму вносится до 5 МВт мощности, из которых плазмой захватывается 2–3 МВт. При этом продольные потери через магнитные пробки составляют лишь сотни киловатт. Исследования, проведенные в работах [2; 3] показали, что прочие потери (на рекомбинацию бы-

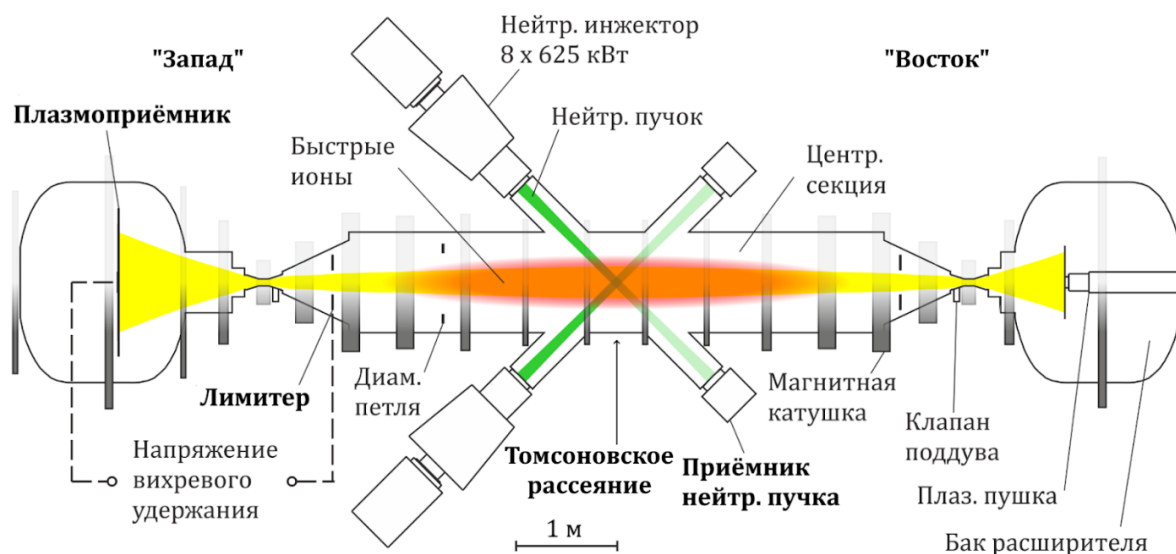


Рис. 1. Схема установки ГДЛ. Жирным шрифтом выделены места расположения использованных в работе диагностик

Fig. 1. The layout of GDT. The locations of the diagnostics used in the study are marked in bold

стрых ионов, излучение из плазмы и поперечный перенос) составляют лишь небольшую долю от продольных. Таким образом, канал потерь нескольких мегаватт остается неопределенным. Так как задача удержания энергии является одной из приоритетных для открытых ловушек в целом и для ГДЛ в частности, то важно определить каналы данных потерь, чтобы по возможности их минимизировать.

Численное моделирование, проделанное в [4], показало, что популяция быстрых ионов теряет свою энергию преимущественно на периферийных слоях плазмы. Максимум мощности потерь при этом локализован вблизи крайней силовой линии (далее – лимитерной линии), определяемой положением лимитера – кольцевого электрода, ограничивающего радиус плазменного столба. Таким образом, возможно, что горячая периферийная плазма может попадать

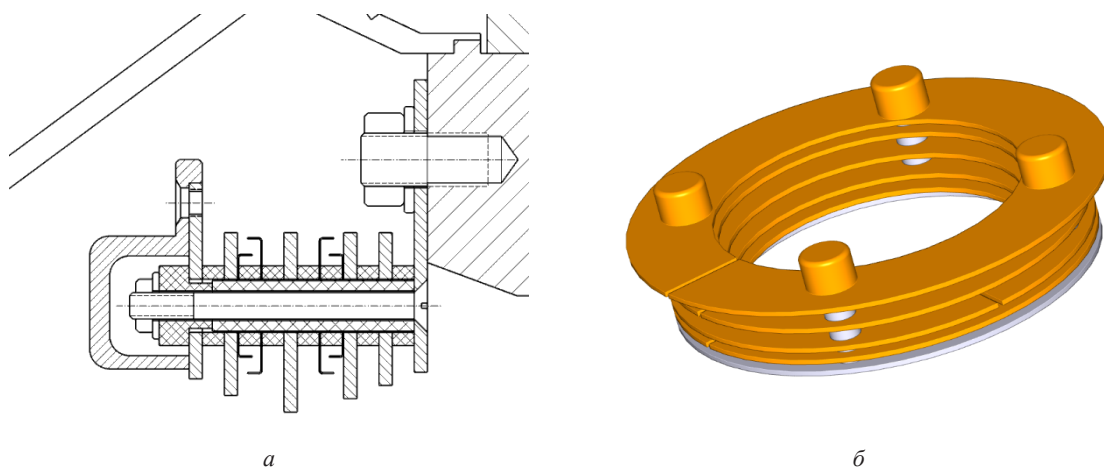


Рис. 2: а – чертеж лимитера в установке (в разрезе), б – трехмерная модель. Первое кольцо обращено к основному объему плазмы, на третье подается потенциал для «вихревого удержания», последнее, шестое кольцо – основание каркаса из нержавеющей стали

Fig. 2. a – a schematic of the limiter inside the GDT (cutaway view), б – a 3D model of the limiter. The first ring faces the main plasma volume, the “vortex confinement” potential is applied to the third ring, the last, sixth ring is the base of the stainless steel frame

на лимитеры установки и терять на них полученную энергию. Чтобы подтвердить или опровергнуть эту гипотезу, было проведено измерение величины нагрева лимитера.

Для проведения эксперимента штатный лимитер установки ГДЛ из нержавеющей стали, расположенный в «западной» части установки (рис. 1), был заменен на специально изготовленный лимитер, состоящий из пяти медных колец (рис. 2). Кольца имели разные внутренние диаметры, были разрезаны во избежание больших наведенных магнитным полем токов и изолированы друг от друга керамикой. Для реализации «вихревого удержания» плазмы [5] на среднем (третьем) кольце поддерживался электрический потенциал в 250 В относительно «земли» установки, остальные кольца находились под «плавающим» потенциалом плазмы. Нагрев колец измерялся закрепленными на них терморезисторами Pt-100, температура вычислялась измерительными модулями ADAM-5013 с точностью 0,1 %.

Для каждого кольца записывалась временная зависимость температуры, которая разделялась на участки «до» и «после» выстрела плазмы. На участке «после» выстрела определялся момент времени, в который температура была максимальна. В участок «до» вписывалась прямая линия, симулирующая остывание кольца, которая экстраполировалась на участок «после» выстрела. По разности записанного максимума температуры и точки, лежащей на экстраполированной в тот же момент времени прямой остывания, определялась разность температур ΔT , из которой по формуле $Q = cm\Delta T$ рассчитывался нагрев кольца. Расчет полных потерь энергии на лимитере в выстреле производился суммированием энергий, осажденных на каждом кольце.

Следует отметить, что даже в разрезанных кольцах лимитера магнитное поле установки наводит токи, достаточные для заметного нагрева колец (рис. 3). Поправка на нагрев от данных токов производилась путем записи перед каждой серией экспериментов «фоновый» выстрел без плазмы, определением нагрева колец в данном выстреле и вычитанием данного «фоновый» нагрева из значений, полученных в последующих выстрелах с плазмой. Нагрев лимитера мишенной плазмой без инъекции нейтральных пучков был крайне небольшим, и сигнал практически не отличался от обычного «фоновый». Нагрев разных колец (рис. 4) различался ввиду разных масс колец и разных поступающих потоков плазмы. Первое кольцо имело наибольшую площадь и было обращено к плазме непосредственно; кольца 2 и 3 частично находились в его «тени», что ограничивало принимаемые ими потоки плазмы. При этом кольцо 3 имело наименьший внутренний радиус, а значит, что на него приходилась самая «горячая» часть потока. Кольца 4 и 5 полностью находились в «тени» кольца 3, поэтому потоки на них были минимальны, отсюда их малый нагрев. Причиной низкого темпа роста сигнала второго кольца, по-видимому, являлся плохой физический контакт терморезистора с кольцом: отличие

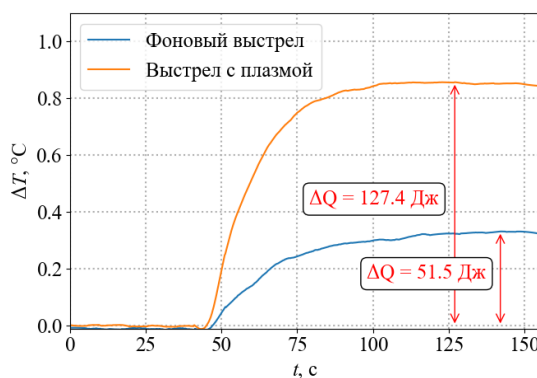


Рис. 3. Сравнение показаний температур в «фоновом» и «плазменном» выстрелах для одного кольца
Fig. 3. The comparison of temperature readings between a “background” and a “plasma” shot for the same ring

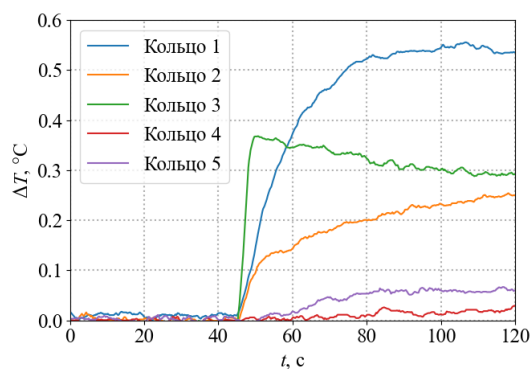
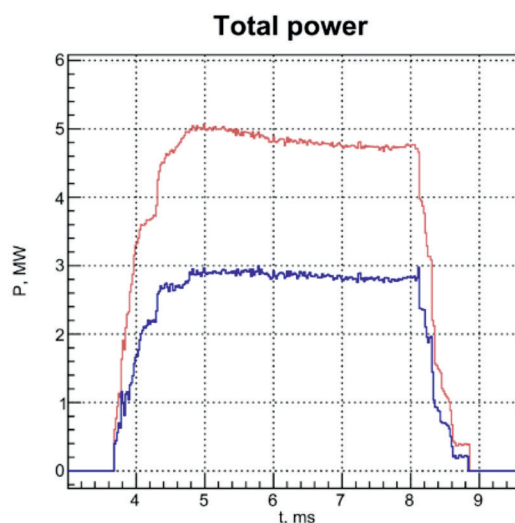


Рис. 4. Динамика нагрева разных колец лимитера в одном выстреле с плазмой (при вычитанном «фоне»)
Fig. 4. The heating dynamics of different limiter rings in the same “plasma” shot (with subtracted “background”)

же формы сигнала кольца 3 могло быть обусловлено подачей на него потенциала «вихревого удержания», что могло приводить к возникновению на этом кольце дуговых разрядов, влияющих на поток тепла.

Рис. 5. Измерение захваченной мощности нейтральных пучков. Красная линия – суммарная мощность пучков без плазмы, синяя – захваченная плазмой мощность

Fig. 5. Measurement of power captured from the neutral beams. The red line shows the total beam power without plasma in the device, the blue – the power captured by the plasma



Измерения захваченной плазмой энергии проводились с помощью вторично-эмиссионных датчиков, установленных в приемниках нейтральных пучков установки. Захваченная от пучков мощность определялась как разность мощности, полученной в импульсе с плазмой, и мощности выстрела без плазмы (рис. 5). Захваченная плазмой энергия определялась интегрированием захваченной мощности по времени и варьировалась в ходе эксперимента путем изменения плотности плазмы и посредством частичного отключения инжекторов нейтральных пучков.

Также в эксперименте проводились измерения продольных потерь из плазмы через магнитную пробку. Для этого использовалась система пирозлектрических болометров (устройство болометров описано в работе [6]), расположенных на «западном» плазмоприемнике установки в расширительном баке. Система состояла из 21 датчика, расположенного на пластине крестообразно (рис. 6). Полная энергия продольных потерь в «западную» пробку установки получалась интегрированием показаний датчиков по площади плазмоприемника и по времени (рис. 7).

По результатам измерений была построена зависимость энергетических потерь на лимитере от захваченной плазмой энергии (рис. 8). Измерения показали, что при захвате плазмой энергии до 14 кДж на лимитере осаждается не более 400 Дж. Если просуммировать потери на лимитере с потерями на плазмоприемнике и удвоить эту сумму (чтобы учесть потери на «восточный» лимитер и в «восточную» пробку), то окажется, что суммарные потери по этим каналам не превышают 3 кДж (рис. 9). Вписанная в данные результаты методом наименьших квадратов прямая имеет угловой коэффициент, близкий к 0,2, а значит, потери на лимитеры и в магнитные пробки составляют приблизительно 20 % от захваченной энергии.

В предположении, что моделирование не точно предсказывает расположение пика потерь мощности нейтральных пучков по радиусу, была проведена дополнительная серия экспериментов с ослаблением силы поля «западной» магнитной пробки при поддержании постоянного уровня захваченной плазмой энергии. Ослабление магнитного поля пробки приводит к тому, что лимитерная силовая линия смещается ближе к оси установки, позволяя тем самым собрать на лимитер больший поток плазмы (рис. 10). В этом случае, если

энергосодержание периферийной плазмы действительно высоко, то поток этой плазмы будет направлен на лимитер и будет наблюдаться нагрев, соответствующий энергии порядка нескольких килоджоулей.

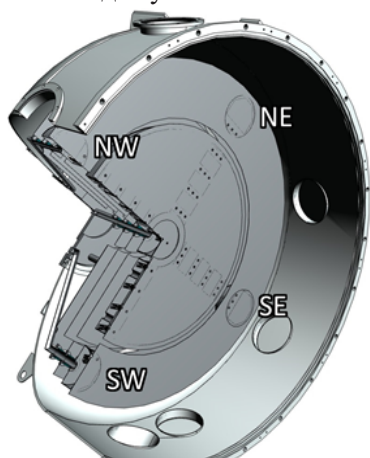


Рис. 6. Схема расположения болометров на плазмоприемнике

Fig. 6. The bolometer layout on the plasma absorber

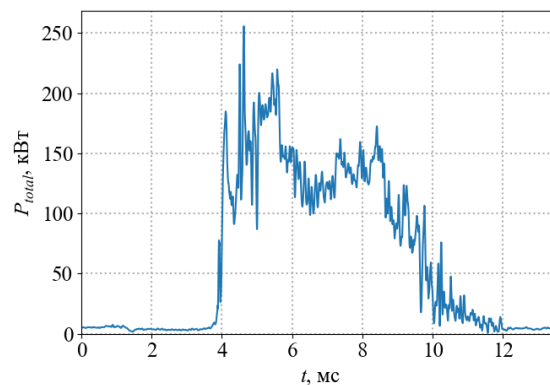


Рис. 7. Характерный сигнал полной мощности энергетических потерь на плазмоприемнике, измеренный системой пироэлектрических болометров

Fig. 7. A typical signal of total power losses on the plasma absorber measured by the pyrobolometer system

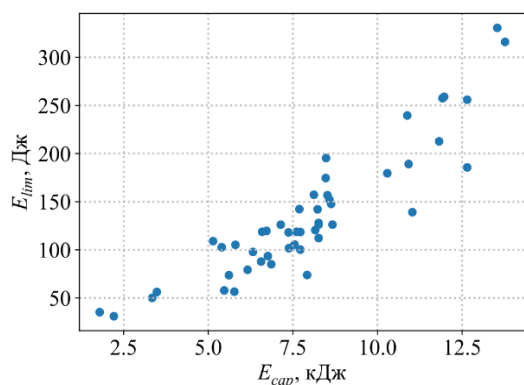


Рис. 8. Зависимость потерь энергии на лимитере от захваченной плазмой энергии

Fig. 8. Energy losses on the limiter versus the energy captured by the plasma

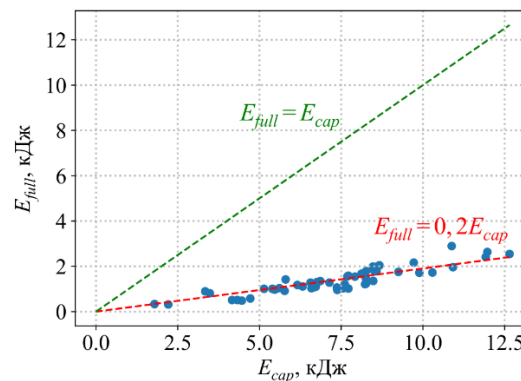


Рис. 9. Зависимость потерь энергии на лимитеры и через обе магнитные пробки от захваченной плазмой энергии

Fig. 9. Energy losses on limiters and through both magnetic mirrors versus the energy captured by the plasma

Результаты данной серии экспериментов (рис. 11) показали, что даже при ослаблении магнитного поля в пробочной катушке на 30 % нагрев лимитера возрос приблизительно вдвое, но не превысил 400 Дж. Результаты согласуются с оценкой, полученной при интегрировании формулы, описывающей радиальное распределение продольного потока энергии мишенной плазмы при ее газодинамическом течении в приближении равенства ионной и электронной температур [7]

$$q(r) \approx 1,53n(r)T_e(r) \sqrt{\frac{T_e(r)}{2\pi m_i}}$$

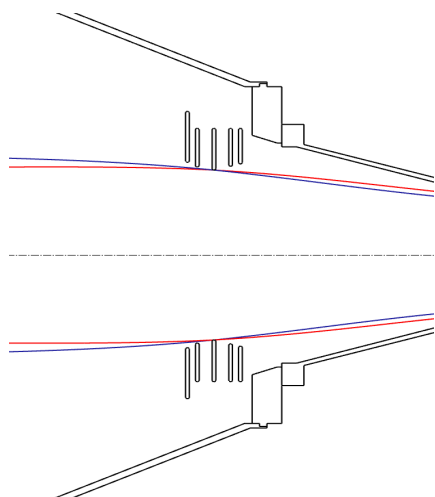


Рис. 10. Лимитерная силовая линия при разных силах поля в пробке. Синяя линия – сильное поле, красная линия – ослабленное поле

Fig. 10. The limiter field line contour at different values of magnetic field strength in the mirror. The blue line denotes the standard, “strong” field, the red line – the “weakened” field

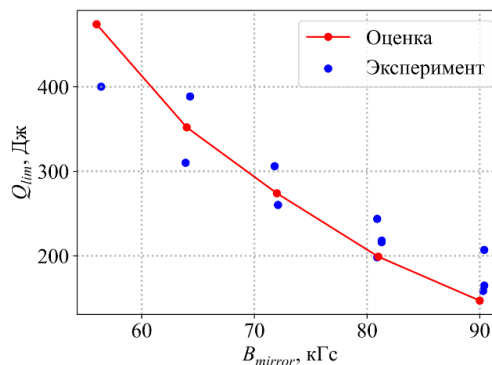
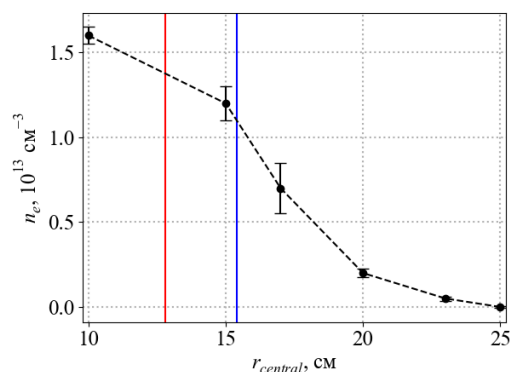
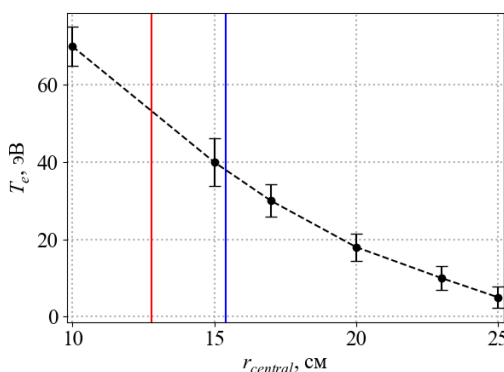


Рис. 11. Зависимость энергетических потерь на лимитере от магнитного поля в ближайшей к нему пробочной катушке

Fig. 11. Energy losses on the limiter versus the magnetic field strength in the closest mirror coil



а



б

Рис. 12. Радиальные распределения плотности электронов (а) и температуры электронов (б) в центральной плоскости установки, измеренные диагностикой томсоновского рассеяния. Синими линиями обозначена проекция лимитера на центральную плоскость при сильном поле, красными – при ослабленном

Fig. 12. Radial distributions of electron density (а) and electron temperature (б) in the midplane of the GDT, measured by the Thomson scattering diagnostic. The blue lines denote the projection of the limiter via magnetic field lines on the midplane at the standard, “strong” field, red lines – at the “weakened” field

по площади кольца, образуемого лимитерной силовой линией и стенкой камеры (рис. 10). Коэффициент 1,53 в приведенной формуле обусловлен учетом движения ионов в немонотонном амбиоплярном потенциале, возникающем между центром ловушки и пробкой, и получен путем численного интегрирования. При оценке потока мощности использовались экспериментальные радиальные профили плотности и температуры в залимитерной области плазмы, полученные с помощью штатной диагностики томсоновского рассеяния (рис. 12).

На основании результатов данного исследования можно сделать вывод, что высокое энергосодержание в периферийной плазме отсутствует, и гипотеза о потере энергии быстрых ионов

на лимитере не подтверждается. Расхождение в приблизительно 80 % захваченной мощности, возможно, объясняется потерями быстрых ионов из установки по каналу резонансной перезарядки на нейтральном газе, поддуваемом в разряд для поддержания баланса частиц. Измерение мощности перезарядных потерь станет предметом дальнейших исследований, которые готовятся в данный момент.

Список литературы

1. **Simonen T. C. et al.** High beta experiments in the GDT axisymmetric magnetic mirror // *Journal of fusion energy*. 2010. Т. 29. №. 6. С. 558–560.
2. **Bagryansky P. A. et al.** Effect of fast Ti-deposition on gas recycling at the first wall and on fast ion losses in the GDT experiment // *Journal of nuclear materials*. 1999. Т. 265. № 1–2. С. 124–133.
3. **Soldatkina E. I., Bagryansky P. A., Solomakhin A. L.** Influence of the radial profile of the electric potential on the confinement of a high- β two-component plasma in a gas-dynamic trap // *Plasma Physics Reports*. 2008. Т. 34. № 4. С. 259–264.
4. **Bagryansky P. A. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror // *Nuclear Fusion*. 2015. Т. 55. №. 5. 053009.
5. **Beklemishev A. D. et al.** Vortex confinement of plasmas in symmetric mirror traps // *Fusion science and technology*. 2010. Т. 57. № 4. С. 351–360.
6. **Soldatkina E. I. et al.** Measurements of axial energy loss from magnetic mirror trap // *Nuclear Fusion*. 2020. Т. 60. № 8. 086009.
7. **Мирнов В.В., Ткаченко О. А.** Распределение электростатического потенциала в газодинамической ловушке // *Препринт 86-28 ИЯФ СО АН СССР* – 1986.

References

1. **Simonen T. C. et al.** High beta experiments in the GDT axisymmetric magnetic mirror // *Journal of fusion energy*. 2010. Vol. 29. no. 6. P. 558–560.
2. **Bagryansky P. A. et al.** Effect of fast Ti-deposition on gas recycling at the first wall and on fast ion losses in the GDT experiment // *Journal of nuclear materials*. 1999. Vol. 265. no. 1-2. P. 124–133.
3. **Soldatkina E. I., Bagryansky P. A., Solomakhin A. L.** Influence of the radial profile of the electric potential on the confinement of a high- β two-component plasma in a gas-dynamic trap // *Plasma Physics Reports*. 2008. Vol. 34. no. 4. P. 259–264.
4. **Bagryansky P. A. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror // *Nuclear Fusion*. 2015. Vol. 55. no. 5. 053009.
5. **Beklemishev A. D. et al.** Vortex confinement of plasmas in symmetric mirror traps // *Fusion science and technology*. 2010. Vol. 57. no. 4. P. 351–360.
6. **Soldatkina E. I. et al.** Measurements of axial energy loss from magnetic mirror trap // *Nuclear Fusion*. 2020. Vol. 60. no. 8. 086009.
7. **Mirnov V. V., Tkachenko O. A.** The distribution of electrostatic potential in the gas dynamic trap // *Preprint. 86-28 INP SB AS USSR, 1986. (in Russ.)*

Информация об авторах

Мейстер Андрей Константинович, аспирант Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Солдаткина Елена Ивановна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Яковлев Дмитрий Вадимович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Information about the Authors

Andrey K. Meyster, postgraduate student, Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russian Federation)

Elena I. Soldatkina, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russian Federation)

Dmitriy V. Yakovlev, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 04.07.2022; одобрена после рецензирования 02.03.23;
принята к публикации 02.03.23*

*The article was submitted 04.07.2022; approved after reviewing 02.03.23;
accepted for publication 02.03.23*