

*На правах рукописи*

**СКОВОРОДИН Дмитрий Иванович**

**ВЛИЯНИЕ САМОСОГЛАСОВАННЫХ ПОЛЕЙ НА  
ПРОДОЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ИЗ ОТКРЫТЫХ  
ЛОВУШЕК**

**01.04.08 - физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2014**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

**БЕКЛЕМИШЕВ** – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.  
Алексей Дмитриевич

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**ПАСТУХОВ** – доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, г. Москва, начальник лаборатории  
Владимир Павлович

**ШАПИРО** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.  
Давид Абрамович

**ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в «\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А. А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В современных аксиально-симметричных открытых плазменных ловушках продольные потери играют определяющую роль в энергобалансе плазмы. Для того чтобы создать эффективный источник нейтронов или энергетический реактор синтеза на основе линейной системы, требуется разрабатывать способы уменьшения темпа истечения плазмы вдоль магнитного поля. Поэтому исследование режимов продольного удержания плазмы важно для определения термоядерных перспектив таких устройств. Существует ряд теоретических моделей продольного удержания плазмы в открытых ловушках. Однако эти модели учитывают не все факторы, которые оказывают влияние на темп продольных потерь в экспериментах. Ранее не исследовано влияние самосогласованных полей на удержание ионов в переходном режиме от гидродинамического истечения к адиабатическому удержанию, когда  $\lambda \sim L$  ( $\lambda$  — длина свободного пробега,  $L$  — длина ловушки). Изучение этого режима требуется для трактовки результатов экспериментов на существующих ловушках ГОЛ-3 и ГДЛ [1, 2] и для проектирования перспективных субтермоядерных устройств [3]. Данная диссертация посвящена теоретическому исследованию продольных потерь плазмы в кинетическом режиме из двух классов открытых ловушек: гофрированной ловушки и зеркальной ловушки с большим пробочным отношением.

Гофрированная (многопробочная) ловушка [4] является открытой аксиально-симметричной системой для удержания плотной плазмы ( $\lambda < L$ ). Существующая теория истечения плазмы из гофрированной ловушки основана на квази-гидродинамическом подходе. Эксперименты на установке ГОЛ-3 [1, 5] требуют изучения режимов с редкими столкновениями и сильно развитой турбулентностью. Поэтому необходимо развивать кинетические методы описания плазмы в гофрированной ловушке.

Эксперименты по измерению времени жизни горячей плазмы в ловушке ГОЛ-3 указывают на аномальную столкновительность ионов при истечении вдоль магнитного поля [6]. Время жизни плазмы в этих экспериментах оказалось неожиданно большим и приближенно соответствовало режиму оптимального удержания  $l \sim \lambda$ . Однако, рассчитанная по плотности и температуре плазмы кулоновская длина свободного пробега на полтора порядка превышает это значение. Таким образом, парные столкновения не могут объяснить наблюдаемое время жизни плазмы в ГОЛ-3, что указывает на существование механизма коллективного рассеяния в этих условиях. На установке ГОЛ-3 [1, 5] на стадии распада плазмы были

зарегистрированы продольные колебания в ячейках ловушки на частоте, близкой к локальной баунс-частоте ионов. Эти колебания были идентифицированы как баунс-неустойчивость продольной звуковой волны [7], которая вызвана инверсным градиентом по продольной энергии функции распределения запертых ионов. Неравновесная функция распределения может формироваться за счет столкновительного «трения» с пролетными ионами. Интерес к этим колебаниям связан с тем, что они могли бы эффективно рассеивать пролетные ионы, так как их частота близка обратному времени пролета иона через ячейку гофрировки. Недавно подобные звуковые колебания плазмы на средней баунс-частоте горячих ионов были замечены на установке ГДЛ. Таким образом, актуальным является исследование дискретной звуковой моды в плазме открытых ловушек.

Аксиально симметричные пробочные ловушки являются базовым элементом для большинства открытых магнитных систем, поэтому требуется детальное изучение режимов продольных потерь из таких ловушек. Несмотря на обширные исследования удержания плазмы в открытых ловушках, влияние самосогласованного амбиполярного поля на потери в режиме  $\lambda \sim L$  ранее количественно не исследовалось. Интерес к этому режиму вызван, в частности, экспериментами на установке ГДЛ в ИЯФ СО РАН. В недавних экспериментах [2] была изучена эффективность использования амбиполярных пробок для подавления продольных потерь частиц и энергии из газодинамической ловушки. В них наблюдалось неожиданно высокое подавление потока ионов в пробку (более чем в пять раз при плотности горячих ионов всего в полтора-два раза выше фоновой), которое может объясняться отличием режима истечения от газодинамического. Таким образом, актуально исследование продольных потерь плазмы из пробочной ловушки в режиме переходной столкновительности.

**Целью диссертационной работы** является изучение основных физических явлений, определяющих продольные потери плазмы из открытых ловушек в режиме переходной столкновительности  $L \sim \lambda$ . Это предполагает:

- изучение функции распределения в многопробочной ловушке в случае мелкомасштабной гофрировки, когда длина свободного пробега много больше, чем длина гофрировки магнитного поля;
- исследование условий существования стоячей звуковой волны в плазме открытой ловушки;

- создание теоретической модели продольных потерь плазмы из пробочной ловушки в режиме переходной столкновительности.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертации получены либо лично автором, либо при его решающем участии. Автор активно участвовал в постановке задач диссертации в рамках предложенного ему направления работы. Автором построена корректная теоретическая модель истечения плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме, исследованы условия существования дискретной звуковой моды в открытой ловушке с анизотропной плазмой, построена численная модель продольных потерь плазмы из пробочной ловушки в переходном режиме.

**Научная новизна** работы заключается в том, что:

- впервые построена корректная модель истечения плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме с использованием несимметричных граничных условий для локальной задачи и уточнён темп продольных потерь частиц, который оказался в 1,5 – 2 раза ниже предсказаний квази-гидродинамической теории;
- получено волновое уравнение, описывающее продольное распространение медленного магнитного звука в тонкой анизотропной плазме, учитывающее диамагнетизм и продольную неоднородность плазмы;
- исследованы стоячие звуковые волны в многопробочной ловушке с обеднённым конусом потерь и в ловушке с плещущимися ионами;
- создана численная кинетическая модель истечения плазмы из открытой ловушки, описывающая переход к газодинамическому режиму, с учётом влияния амбиполярного потенциала;
- обнаружен переходный режим истечения плазмы, в котором продольные потери происходят с образованием струи холодных ионов, и получено самосогласованное аналитическое решение для струи в ловушке с «плоским дном».

**Научная и практическая значимость работы** состоит в том, что созданные теоретические и численные модели могут использоваться для описания существующих экспериментов по удержанию плазмы в открытых аксиально-симметричных ловушках и для проектирования будущих

экспериментов, направленных на достижение термоядерных параметров плазмы в открытых ловушках. Созданные численные модели могут использоваться для изучения режимов продольных потерь плазмы из открытых ловушек при  $L \sim \lambda$ . Теоретическая модель локализации квазипродольного звука в открытых ловушках может послужить базой для разработки кинетической модели неустойчивости звуковых колебаний в ловушках с неравновесным распределением ионов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Корректная модель истечения плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме.
- Волновое уравнение для квазипродольного звука в тонкой анизотропной плазме, учитывающее диамагнетизм и продольную неоднородность плазмы.
- Дискретные продольные звуковые моды в многопробочной ловушке с обеднённым конусом потерь и в ловушке с плещущимися ионами, локализующиеся за счет неоднородности плазмы.
- Переходный режим истечения плазмы из пробочной ловушки, в котором продольные потери происходят с образованием струи холодных ионов.
- Существенное подавление продольных потерь ионов из зеркальной ловушки в переходном режиме  $L \sim \lambda$  при помощи амбиполярного барьера  $e\Delta\varphi \sim T_e$ .

### **Апробация работы**

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах ИЯФ СО РАН (Новосибирск), на трёх Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2009, 2010, 2013), на 8-ой международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (OS-2010, July 5-9, Novosibirsk, Russia), на 9-ой международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (OS-2012, August 27-31, Tsukuba, Japan).

Результаты диссертации опубликованы также в российских и зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Диссертация содержит 97 страниц и библиографический список из 48 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дается краткий обзор существующих теоретических и численных подходов к решению задачи о вычислении продольных потерь плазмы из открытых ловушек, обосновывается актуальность исследований и формулируются задачи, решению которых посвящена работа.

**В первой главе** изучается функция распределения в многопробочной ловушке в случае мелкомасштабной гофрировки, когда длина свободного пробега много больше, чем длина гофрировки магнитного поля.

Существовавшая ранее теория истечения плазмы из гофрированной ловушки основана на квази-гидродинамическом подходе. Хотя движение плазмы не подчиняется уравнениям двухжидкостной гидродинамики, условие  $\lambda \ll L$  позволяет во многих случаях считать функцию распределения близкой к максвелловской. Поэтому течение плазмы может быть описано макроскопическими уравнениями. В работе [8] были получены уравнения на концентрацию и температуру плазмы, а также вычислены коэффициенты переноса, позволяющие замкнуть эту систему уравнений. Для этого были найдены потоки вещества и энергии, которые выражены в виде произведения градиентов равновесных параметров плазмы вдоль системы и соответствующих коэффициентов переноса. Эти потоки определяются поправкой к максвелловской функции распределения, которая найдена при помощи линеаризованного кинетического уравнения. При рассмотрении одной ячейки гофрировки на поправку к функции распределения налагаются периодические граничные условия.

Такая постановка задачи для вычисления поправки к функции распределения в ячейке гофрировки хорошо подходит для рассмотрения периодических систем, например, влияние кулоновских столкновений на нелинейную волну или влияние гофрировки на продольные переносы в тороидальной ловушке [9, 10]. Однако в случае, когда вдоль системы существует градиент равновесных параметров плазмы, который рассматривается в этой работе, такое граничное условие нарушает непрерывность функции распределения вдоль ловушки – она терпит разрывы в пробках. Кинетическое уравнение является уравнением переноса вдоль траекторий частиц в фазовом пространстве. В правой части этого уравнения находится интеграл столкновений, который описывает диффузию частиц

в пространстве скоростей. На самом деле естественная постановка задачи для такого уравнения предполагает задание в пробках распределения частиц, влетающих в ячейку.

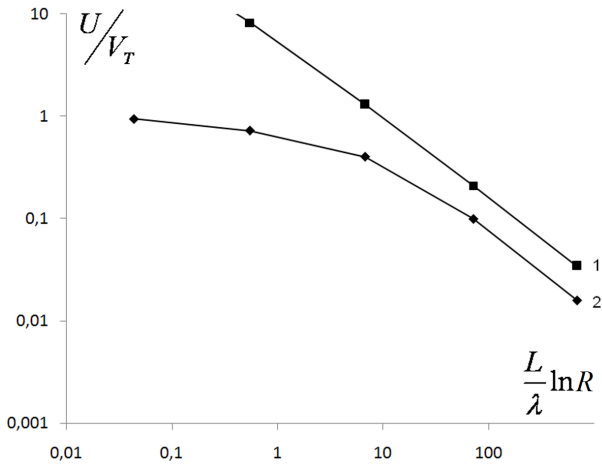


Рис. 1. Зависимость средней направленной скорости течения, деленной на тепловую, от отношения длины ловушки к эффективной длине свободного пробега  $(L/\lambda)I$  при истечении в вакуум ( $T = 1000\text{эВ}$ ,  $R = 10$ ). Кривая 1: Предел мелкомасштабной гофрировки (В. В. Мирнов), кривая 2: кинетическая теория.

В данной главе на основе корректных граничных условий исследована функция распределения в многопробочной ловушке в случае мелкомасштабной гофрировки, когда длина свободного пробега много больше, чем длина гофрировки магнитного поля. В первом разделе главы конкретизирована постановка задачи и описан общий метод её решения. Во втором разделе описано решение «локальной» задачи о течении плазмы через отдельный пробкотрон. Использовано приближение большого пробочно-го отношения  $R \gg 1$ , которое позволяет упростить кинетическое уравнение и аналитически решить его интегрированием по невозмущенным траекториям. В третьем разделе описано решение «глобальной» задачи о вычислении функции распределения вдоль всей ловушки. В силу нелинейности задачи, которая вызвана зависимостью коэффициентов в интеграле столкновений от параметров плазмы, данная задача решалась численно при помощи релаксационной разностной схемы. В четвертом разделе представлены результаты решения. Особое внимание уделено за-



даче о стационарном истечении плазмы в вакуум. При уменьшении длины свободного пробега  $\lambda < L$  наблюдается переход к многопробочному удержанию, причем темп потерь примерно в 2 раза ниже предсказаний квази-гидродинамической модели (смотри рисунок 1).

**Во второй главе** описаны результаты исследования условий существования стоячих звуковых волн в открытых ловушках с анизотропной плазмой. Задача решается в следующих предположениях:

- плазма имеет конечное  $\beta$  (отношение давления плазмы к магнитному давлению);
- плазма длинная и тонкая,  $L \gg a$  (параксиальность);
- продольная длина волны порядка длины ловушки и много больше, чем диаметр плазмы,  $\lambda \gg a$ ;
- частота колебаний много меньше ионной циклотронной,  $\omega \ll \Omega_{ci}$ , поэтому будем использовать уравнения идеальной магнитной гидродинамики;
- частота столкновений ниже частоты колебаний, поэтому используем адиабату ЧГЛ (Чу-Голдбергера-Лоу);
- как равновесие, так и колебания имеют осевую симметрию.

В первом разделе главы подробно изложена используемая модель, основанная на адиабатической теории ЧГЛ. Особое внимание уделено её условиям применимости и ограничениям, в том числе подробно обсуждается затухание Ландау и дебаевская экранировка, которые не могут быть исследованы на основе модели ЧГЛ.

На основе уравнений идеальной магнитной гидродинамики получено линейное волновое уравнение, описывающее продольную динамику анизотропной плазмы в открытой ловушке на звуковых частотах. Предложен метод изучения частично локализованных решений этого уравнения. Для этого волновое уравнение приводится к виду уравнения Шрёдингера, эффективный потенциал которого определяется продольными профилями параметров плазмы.

На основе этого метода исследованы условия локализации звуковой волны для двух типов равновесий: пробкотрон с обедненным конусом потерь и ловушка с плещущимися ионами. Первый случай моделирует ячейку многопробочной ловушки в режиме  $L \sim \lambda$ . Показано, что обеднение конуса потерь примерно в 3 раза приводит к появлению дискретной

звуковой моды. Локализация волны усиливается при укручении продольного профиля магнитного поля. В ловушке с плещущимися ионами стоячая волна с максимумом амплитуды в центральной части существует при большом отношении давления плещущихся ионов к давлению фоновой плазмы.

**В третьей главе** изложены результаты исследования продольных потерь плазмы из пробочной ловушки в режиме переходной столкновительности. Модель основана на интегрировании стационарного кинетического уравнения с интегралом столкновений Ландау. Кинетическое уравнение интегрируется вдоль характеристик, которые являются фазовыми траекториями ионов в эффективном потенциале Юшманова. Так как электроны удерживаются в ловушке электростатическим потенциалом, их распределение близко к больцмановскому, что позволяет стандартным образом вычислить амбиполярный потенциал по плотности плазмы  $e\varphi = T_e \ln(n/n_0)$ .

Для решения кинетического уравнения разработана сеточная численная схема. Исследование режима с редкими столкновениями требует уменьшения паразитной численной диффузии схемы до уровня, меньшего физической диффузии в пространстве скоростей. Для этого была использована схема, включающая в себя интегрирование интеграла столкновений вдоль траектории частиц, которая гарантирует, что коэффициент численной диффузии подавлен по сравнению с частотой столкновений в  $N_{\parallel}$  раз (где  $N_{\parallel}$  – количество узлов сетки по продольной скорости). Результаты численного моделирования и аналитического исследования функции распределения ионов в пробочной ловушке хорошо воспроизводят известные решения в пределах  $L \gg \lambda$  и  $L \ll \lambda$ .

При рассмотрении случая промежуточной столкновительности ( $\lambda \sim L$ ) обнаружен режим, в котором продольные потери происходят с образованием струи холодных ионов. Заполнение конуса потерь частицами определяется балансом между столкновительным заполнением за счет диффузии из запертой области и выносом вдоль траекторий. При увеличении частоты столкновений первыми заполняются траектории с большим временем пролета. Так как обычно плазма заряжена положительно, в центре ловушки образуется горб потенциальной энергии для ионов. На фазовой плоскости ионов  $Z - V_{\parallel}$  появляется сепаратриса с  $x$ -точкой, причем время движения по ней бесконечно. Таким образом, ионы эффективно заполняют траектории вблизи сепаратрисы и, ускоряясь амбиполярным потенциалом, образуют струю, вылетающую из ловушки.

Последний раздел главы посвящен результатам моделирования амбиполярного подавления продольных потерь из ловушки при помощи ам-

биполярной пробки в режиме  $L \sim \lambda$ . Так как конус потерь в этом случае заполнен при низких энергиях и практически пуст при энергиях выше тепловой, поток ионов может быть заперт даже невысоким амбиполярным барьером порядка  $T_e$ . Данный результат качественно согласуется с результатами экспериментов на установке ГДЛ [2] (смотри рисунок 2).

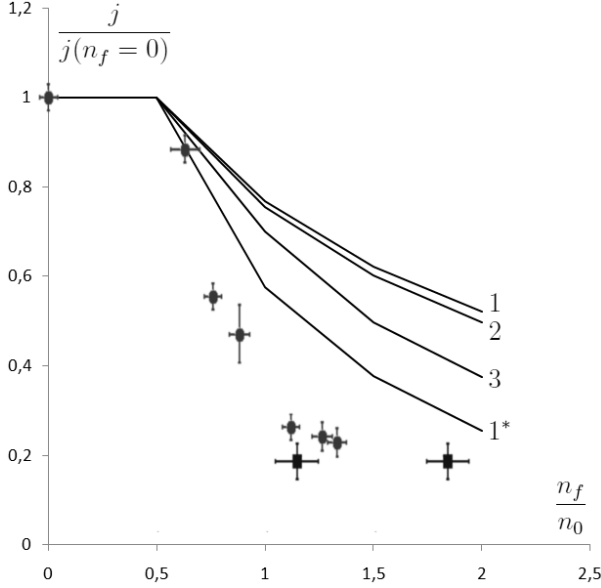


Рис. 2. Зависимость коэффициента подавления потока ионов от отношения плотности горячих ионов к плотности тепловой плазмы. 1 – при  $L/\lambda = 10$ ,  $T_e = T_i$ ; 2 – при  $L/\lambda = 1$ ,  $T_e = T_i$ ; 3 – при  $L/\lambda = 0, 1$ ,  $T_e = T_i$ ; 1\* – при  $L/\lambda = 10$ ,  $T_e = 2 \cdot T_i$ . Отдельными точками показаны результаты экспериментов на установке ГДЛ (из работы [2]).

**В Заключение** перечислены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена корректная модель истечения плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме.
2. Численное моделирование подтверждает переход к многопробочному удержанию при  $L \gg \lambda$ .

3. Уточнённый темп продольных потерь частиц из ловушки в пределе мелкомасштабной гофрировки в 1,5 – 2 раза ниже предсказаний квази-гидродинамической теории.
4. Получено волновое уравнение для квазипродольного звука в тонкой анизотропной плазме, учитывающее диамагнетизм и продольную неоднородность плазмы.
5. Звук может отражаться от неоднородности плазмы или от областей, в которых он замедляется из-за диамагнетизма.
6. Обнаружены дискретные продольные звуковые моды в многопробочной ловушке с обеднённым конусом потерь и в ловушке с плещущимися ионами, локализующиеся за счет неоднородности.
7. Создана численная кинетическая модель истечения плазмы из открытой ловушки, описывающая переход к газодинамическому режиму. Модель согласуется с известными пределами.
8. Исследован переходный режим истечения плазмы, в котором продольные потери происходят с образованием струи холодных ионов. Получено самосогласованное аналитическое решение для струи в ловушке с «плоским дном», существующее при не слишком редких столкновениях.
9. Проведено моделирование подавления продольных потерь ионов при помощи амбиполярной пробки. Обнаружено существенное подавление продольных потерь ионов из зеркальной ловушки в переходном режиме  $L \sim \lambda$  при помощи амбиполярного барьера  $e\Delta\varphi \sim T_e$ .

Основные результаты диссертации **опубликованы** в следующих работах:

1. *D. I. Skovorodin, A. D. Beklemishev*, Numerical Kinetic Model of Axial Confinement in a Mirror Trap// Fusion Science and Technology. -2010. -V. 59(1T). -P. 199-201.
2. *Д. И. Сквородин, А. Д. Беклемисhev*, Истечение плазмы из гофрированной ловушки в кинетическом режиме// Физика плазмы. -2012. -Т.38, -с.226-230.

3. *D. I. Skovorodin, A. D. Beklemishev*, Flow-Driven Drift Instability in a Multiple-Mirror Trap// Fusion Science and Technology. -2013. - V.63(1T). -P. 256-258.
4. *D. I. Skovorodin, K. V. Zaytsev, A. D. Beklemishev*, Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure// Physics of Plasmas. -2013. -V.20. -P.102123-1–102123-9.
5. *Д. И. Сквородин, А. Д. Беклемишев*, Численная кинетическая модель истечения плазмы из зеркальной ловушки// Тезисы докладов XXXVII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2010, с. 82.
6. *Д. И. Сквородин, А. Д. Беклемишев*, Неустойчивость потока плазмы в многопробочной ловушке// Тезисы докладов XL Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2012, с. 66.

## Список литературы

- [1] *A. V. Arzhannikov, A. M. Batrakov, A. V. Burdakov et.al*, Experimental Study of the Dynamics of Neutron Emission from the GOL-3 Multimirror Trap// Plasma Physics Reports. -2006. -V.32. -p. 94-102.
- [2] *А. В. Анжеев, П. А. Багрянский, А. Д. Беклемишев et. al*. Подавление продольных потерь в газодинамической ловушке при помощи амбиоплярной пробки// Физика плазмы. -2010.- Т.36. -с.413-422.
- [3] *A. D. Beklemishev*, Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap// Fusion Science and Technology. -2013. -V.63 (1T). -p.46-51.
- [4] *Г. И. Будкер, В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов*, Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы// Письма в ЖЭТФ. -1971. -Т.14. -С.320-322.
- [5] *A. V. Burdakov A. A. Ivanov, E. P. Kruglyakov*, Axially Symmetric Magnetic Mirror Traps: Status and Prospects// Fusion Science and Technology. - 2007. -V.51(2T). -p.17-22.
- [6] *I. A. Kotelnikov*, New Results in the Theory of Multiple Mirror Plasma Confinement// Fusion Science and Technology. -2007. -V.51(2T). -p.186-189.

- [7] *A. D. Beklemishev*, Bounce Instability in a Multiple-Mirror Trap// Fusion Science and Technology. -2007. -V.51(2Т). -p.180.
- [8] *V. V. Mirnov, D. D. Ryutov*, Gas-Dynamic Description of a Plasma in a Corrugated Magnetic Field// Nuclear Fusion. -1972. -V.12. -p.627-636.
- [9] *B. E. Захаров, В. И. Карпман*, К нелинейной теории затухания плазменных волн// ЖЭТФ. -1962. -Т.43. С.491-499.
- [10] *Б. Н. Брейзман, В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов*, Омическое сопротивление неоднородной плазмы// ЖЭТФ. -1970. -Т.58. С.1771-1783.