

# Прямое наблюдение аномально низкой продольной электронной теплопроводности во время коллективной релаксации сильноточного релятивистского электронного пучка в плазме

А. В. Аржанников, В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков<sup>1</sup>), И. А. Иванов, В. С. Койдан, К. И. Меклер, В. В. Поступаев, А. Ф. Ровенских, С. В. Полосаткин, С. Л. Синицкий

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 28 января 2003 г.

После переработки 18 февраля 2003 г.

Представлены результаты проведенных на многопробочной ловушке ГОЛ-3 экспериментов с коротким участком пониженного магнитного поля (“магнитной ямой”). Уменьшение удельного энерговыделения от релятивистского электронного пучка на этом участке приводит к образованию области с температурой, в несколько раз меньшей, чем в окружающей плазме. Существование такой низкотемпературной области является прямой демонстрацией эффекта подавления продольной электронной теплопроводности во время коллективного взаимодействия электронного пучка с плазмой.

PACS: 52.25.Fi, 52.35.Qz, 52.40.Mj, 52.55.Jd

**1. Введение.** В физике плазмы обычно существует мнение о том, что любая турбулентность приводит к увеличению коэффициентов переноса и, соответственно, к уменьшению температуры и энергетического времени жизни плазмы. Во многом это связано с тем, что подавляющая часть экспериментальных и теоретических работ по физике термоядерной плазмы связана с установками типа токамак или другими тороидальными системами, в которых энергия из плазмы теряется поперек магнитного поля. В отличие от таких установок, в открытых магнитных системах основным каналом потерь энергии, как правило, является продольная электронная теплопроводность, не позволяющая получать высокую электронную температуру. Реакторные перспективы открытых систем во многом связаны с тем, удастся ли уменьшить эти потери.

В экспериментах по нагреву плазмы сильноточным релятивистским электронным пучком микросекундной длительности на установке ГОЛ-3 [1] была получена электронная температура  $\sim 1$  кэВ, а после модернизации этой установки [2] была достигнута температура до 2–3 кэВ при плотности  $\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Как абсолютная величина температуры, так и ее неравномерное распределение по длине установки, существующее в течение времени  $\sim 5$  мкс, не могли быть объяснены, если полагать, что потери энергии из плазмы идут за счет классической электронной теплопроводности. Для объяснения таких экспериментальных результатов в [3] было высказано предположение,

что из-за высокого уровня турбулентности в плазме существующего в течение инжекции электронного пучка появляется аномально высокая частота рассеяния электронов, приводящая к уменьшению продольной электронной теплопроводности на два-три порядка по сравнению с классической (более детально эта проблема рассмотрена в [4]). Такие эффекты имели место, видимо, и в экспериментах по коллективному взаимодействию наносекундных электронных пучков с плазмой (см., например, [5]), но из-за краткости процесса ( $\sim 50$  нс) они заметно не влияли на динамику нагреваемой пучком плазмы. Известны различные механизмы, приводящие к возникновению аномальной частоты столкновений в турбулентной плазме (см., например, [6] и обзор [7]), а также в системах с электронными пучками (см., например, обзор [8]). В нашем случае возможен следующий механизм появления такой аномалии: электронный пучок при коллективной релаксации в плазме возбуждает в ней интенсивные резонансные с пучком плазменные (ленгмюровские) колебания. Далее, при нелинейной релаксации этих колебаний, уровень которых может доходить до порога модуляционной неустойчивости, может возникать как интенсивный ионный звук, так и модуляции плотности, связанные с процессами ленгмюровского коллапса (детальное изучение турбулентных процессов, сопровождающих релаксацию релятивистского электронного пучка в замагниченной плазме, проводилось на установке с другими параметрами и опубликовано в [9, 10]).

Недавно на установке ГОЛ-3 была проведена модернизация магнитной системы. Основной целью мо-

<sup>1</sup>) e-mail: A.V.Burdakov@inp.nsk.su

дернизации являлось создание на концевых участках соленоида секций гофрированного магнитного поля (с целью изучения нагрева и удержания плазмы в многопробочной магнитной системе). В ходе этих работ был также проведен эксперимент с участком пониженного магнитного поля в центральной части соленоида. Обсуждение некоторых результатов этого эксперимента и является целью этой публикации.

## 2. Постановка эксперимента и диагностики.

В обсуждаемых экспериментах соленоид установки ГОЛ-3, состоящий из 110 катушек с независимым питанием и общей длиной около 12 м, был сконфигурирован в виде трех секций. В центре была расположена четырехметровая секция с однородным магнитным полем 4.8 Тл. С двух сторон к этой секции примыкали участки гофрированного поля, каждый из которых состоял из 20 периодов гофрировки с полем в максимуме 5.2 Тл, в минимуме 3.2 Тл и шагом 22 см. Соленоид оканчивался одиночными магнитными пробками с полем 9 Тл. В металлической вакуумной камере диаметром 10 см, расположенной внутри соленоида, с помощью специального продольного разряда создавалась исходная водородная или дейтериевая плазма со средней по длине плотностью  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и температурой 2–3 эВ. Далее в эту плазму инжектировался релятивистский электронный пучок, имевший в этих экспериментах следующие параметры: энергия электронов  $\sim 0.9 \text{ МэВ}$ , ток  $\sim 25 \text{ кА}$ , длительность по основанию  $\sim 8 \text{ мкс}$ , энергосодержание  $\sim 120 \text{ кДж}$ . Диаметр пучка в секции однородного поля был около 6 см.

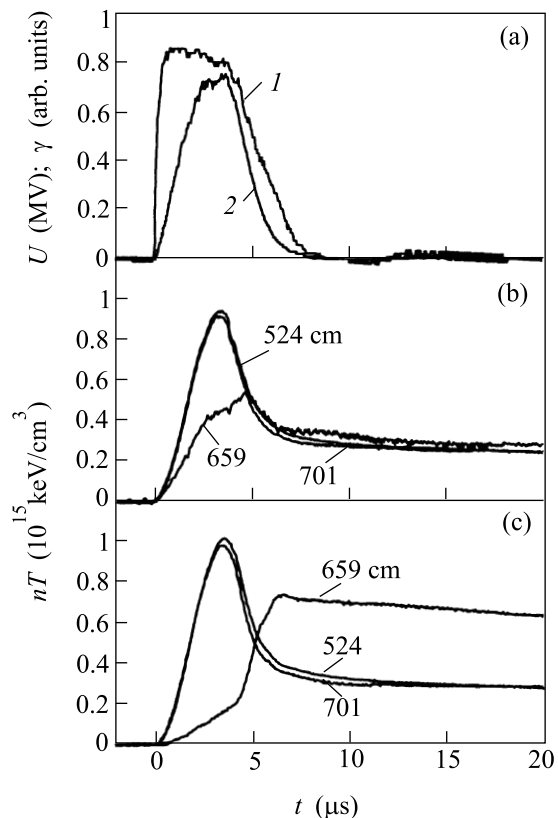
Для описываемой серии экспериментов в центральной секции соленоида был создан специальный участок с пониженным магнитным полем с центром на  $Z = 659 \text{ см}$  (здесь и далее продольная координата будет отсчитываться от середины входной пробки), отличающийся от остальной части соленоида увеличенным на 4 см расстоянием между соседними катушками. Был также увеличен диаметр вакуумной камеры до величины 150 мм на отрезке длиной 42 см. Прилегающие к  $Z = 659 \text{ см}$  катушки имели независимое питание и могли отключаться в некоторых экспериментах. Величина магнитного поля в указанной точке составляла 3.8 Тл при включенных прилегающих катушках и 1.3 Тл – при отключенных. В последнем случае полученная конфигурация магнитного поля представляла собой локальную ловушку (“магнитную яму”) длиной около 30 см.

Нагрев и удержание плазмы изучались при помощи ряда диагностик (см., например, [2]). В этой же работе основное внимание будет уделено данным диагностическим измерениям (на установке работает около

25 датчиков, распределенных по длине). Каждый из “стандартных” датчиков представляет собой петлю, охватывающую плазменный столб (стенку вакуумной камеры можно считать хорошо проводящей на обсуждаемых в работе временах). Датчик, расположенный в области “магнитной ямы”, имел другую конструкцию и был выполнен в форме сегмента кольца. Он находился на  $Z = 659 \text{ см}$  в диагностическом патрубке вблизи границы плазменного столба. Это обстоятельство следует иметь в виду при обсуждении результатов экспериментов (точность абсолютной калибровки этого датчика для случая магнитного поля 1.3 Тл невелика из-за трудности учета влияния скин-токов в элементах конструкции в этом режиме; она может быть оценена в 30%).

## 3. Результаты экспериментов и их обсуждение.

Типичные осциллограммы сигналов приведены на рисунке для случаев сильного и слабого поля в “магнитной яме” центральной секции. Там же



(a) Зависимость  $U$  от  $t$ : 1 – напряжение на диоде, 2 – тормозное излучение с выходного коллектора; (b) и (c) – давление плазмы, измеренное вблизи секции пониженного поля (цифры у кривых соответствуют продольным координатам, на которых расположены датчики): (b)  $B = 3.8 \text{ Тл}$  в центральной секции с центром на 659 см, (c)  $B = 1.3 \text{ Тл}$  там же

для справки показаны сигналы с делителя напряжения генератора пучка и датчика, регистрирующего жесткое рентгеновское излучение с поверхности выходного коллектора, принимающего прошедший через плазму пучок.

Рассмотрим сначала случай с полностью включенным соленоидом (рисунок б). После начала инжекции пучка наблюдается рост давления плазмы до тех пор, пока не начинает уменьшаться мощность инжектируемого электронного пучка. Как указывалось выше, при инжекции пучка происходит нагрев электронов плазмы за счет коллективных эффектов, главным образом за счет возбуждения в плазме ленгмюровских колебаний. Необходимым условием для эффективной релаксации пучка является превышение инкремента пучковой неустойчивости над эффективной частотой электронных столкновений в плазме. Это условие означает, что при заданной плотности плазмы плотность тока пучка должна превышать некоторое критическое значение. В экспериментах на установке ГОЛ-3 при плотности тока пучка масштаба  $1 \text{ кА/см}^2$  максимальная плотность плазмы, при которой еще происходит эффективный нагрев электронов, составляет около  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

В описываемых экспериментах, как и ранее в [1, 2], наблюдается сильная неоднородность нагрева по длине установки, особенно на первых нескольких метрах, однако форма сигналов диамагнитных датчиков подобна приведенному на рисунке б сигналу датчика  $Z = 701 \text{ см}$ . Амплитуда сигнала этого диамагнитного датчика соответствует средней по сечению плазменного столба величине  $D = n_e T_e + n_i T_i \sim 10^{15} \text{ кэВ/см}^3$  (здесь  $n$  и  $T$  – концентрация и температура, индексы  $e$  и  $i$  относятся к электронам и ионам, соответственно). В центральной секции установки продольный градиент давления плазмы уже невелик, сигналы пяти диамагнитных датчиков, расположенных в однородном магнитном поле на координатах от  $Z = 475 \text{ см}$  до  $Z = 844 \text{ см}$ , совпадают в пределах 5% на стадии нагрева плазмы. Форма сигнала датчика на  $Z = 659 \text{ см}$ , расположенного в поле 3.8 Тл, несколько отличается от остальных (рисунок б). Нагрев плазмы в этом месте идет более медленно из-за того, что отношение плотности электронов пучка к плотности электронов плазмы (определяющее при прочих равных условиях эффективность релаксации пучка в плазме, см., например, [11]) на этом участке понижено из-за расширения силовой трубки магнитного поля. После прекращения нагрева плазма быстро остывает, при этом температура по длине выравнивается и показание датчика  $Z = 659 \text{ см}$  становится близким к показаниям соседних датчиков.

Другое поведение давления плазмы в центральной секции наблюдается в случае слабого поля в “магнитной яме” при отключении прилегающих катушек соленоида (см. рисунок с). В целом характер нагрева плазмы на большей части соленоида в этом случае не изменяется, остается неизменным и распределение давления плазмы по длине установки. Но существенные изменения в динамике давления плазмы зарегистрированы датчиком на  $Z = 659 \text{ см}$ . При уменьшении магнитного поля в центральной секции до  $\sim 1.3 \text{ Тл}$  плотность тока пучка уменьшается в 3.7 раза по отношению к участку однородного поля, и пучок уже практически не взаимодействует с плазмой в этом месте. В результате во время инжекции пучка давление плазмы, которое определяется в этот период времени электронной температурой, в секции слабого поля в 5–10 раз меньше, чем регистрируют датчики, находящиеся на расстоянии  $\sim 40 \text{ см}$  в области однородного поля. Важным фактором при этом является то, что из-за подавления продольной электронной теплопроводности (см. Введение) энергия в область минимума магнитного поля практически не перетекает из соседних областей горячей плазмы. Высокий градиент электронной температуры по длине (до  $\sim 2.5 \text{ кэВ/м}$ ) существует в течение стадии нагрева и характеризует степень подавления электронной теплопроводности в это время. После прекращения нагрева эффект аномально низкой теплопроводности пропадает, эффективная частота столкновений в плазме становится классической, и температура начинает быстро выравниваться по длине плазменного столба. В этот момент наблюдается резкий рост давления плазмы в “магнитной яме” (в то время как во всей остальной установке давление плазмы падает). При этом величина  $\beta$  в магнитной яме достигает 15–20%.

Следует отметить еще два момента. Во-первых, небольшой рост давления плазмы в этой части центральной секции сразу после прекращения нагрева заметен и в случае сильного магнитного поля (рисунок б). Во-вторых, как показывают предварительные гидродинамические расчеты при помощи модифицированного кода ISW (первая версия которого использовалась в [4]), из-за появления продольного градиента давления вблизи магнитной ямы на стадии нагрева начинается “сгребание” плазмы в эту область уже в течение длительности импульса пучка. Термализация энергии встречного движения этих плазменных потоков позволяет получать (на некоторое время) в области магнитной ямы давление плазмы, превышающее давление плазмы в соседних областях ловушки.

**4. Заключение.** В середине соленоида установки ГОЛ-3 был сформирован короткий отрезок с магнит-

ным полем 1.3 Тл (что в 3.7 раза меньше, чем в прилегающих участках с однородным полем). Падение локальной плотности электронов релятивистского пучка в этом месте привело к тому, что практически исчез пучковый нагрев плазмы в области слабого поля. Вследствие этого в первоначально однородной плазме в ходе инжекции пучка образовался короткий участок с температурой, в несколько раз меньшей, чем в окружающей плазме. Измеренный продольный градиент давления плазмы соответствует перепаду электронной температуры в  $\sim 1$  кэВ/40 см (при пучковом нагреве плазмы и характерном времени в несколько микросекунд при обсуждаемых параметрах ионная температура много ниже электронной [1]). Существование низкотемпературной области является прямой демонстрацией эффекта подавления продольной электронной теплопроводности на стадии коллективного взаимодействия пучка с плазмой и ее нагрева. После окончания нагрева происходит возврат теплопроводности к классическому значению (подробности см. в [3, 4]), что проявляется как быстрый рост давления плазмы в секции слабого поля при одновременном остывании плазмы в остальной части установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Миннауки и проекта Российского фонда фундаментальных исследований # 00-02-17649. Авторы благодарят Р. Ю. Акентьева, В. Г. Иваненко, В. В. Конюхова, С. А. Кузнецова, А. Г. Макарова, С. С. Перина, Ю. С. Суляева, В. Д. Степанова, А. А. Шошина за по-

мощь в подготовке и проведении экспериментов на установке ГОЛ-3, И. А. Котельникова за полезные дискуссии.

1. А. В. Бурдаков, С. Г. Воропаев, В. С. Койдан и др., *ЖЭТФ* **109**, 2078 (1996).
2. A. V. Arzhannikov, V. T. Astrelin, A. V. Burdakov et al., *Transactions of Fusion Technology* **39**, No.1T, 17 (2001).
3. А. В. Бурдаков, В. В. Поступаев, Препринт ИЯФ СО РАН 92-9, Новосибирск, 1992.
4. В. Т. Астреин, А. В. Бурдаков, В. В. Поступаев, *Физика плазмы* **24**, 450 (1998).
5. A. V. Arzhannikov, A. V. Burdakov, V. S. Koidan, and L. N. Vyacheslavov, *Physica Scripta* **T2/2**, No.1T, 303 (1982).
6. М. В. Бабыкин, П. П. Гаврин, Е. К. Завойский, и др., *ЖЭТФ* **52**, 643 (1967).
7. А. А. Галеев, Р. З. Сагдеев, *Основы физики плазмы*, Дополнение к т.2, М.: Энергоатомиздат, 1984, стр. 5.
8. Р. Н. Судан, *Основы физики плазмы*, Дополнение к т.2, М.: Энергоатомиздат, 1984, стр. 38.
9. В. С. Бурмасов, Л. Н. Вячеславов, И. В. Кандауров и др., *Физика плазмы* **23**, 142 (1997).
10. V. S. Burmasov, V. F. Gurko, I. V. Kandaurov et al., *Abstracts of 28th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics*, Madeira, Portugal, 2001, стр 521.
11. B. N. Breizman and D. D. Ryutov, *Nuclear Fusion* **14**, 873 (1974).