

**В. В. Поступаев^{1,2}, А. В. Бурдаков^{1,2}, И. А. Иванов^{1,2},
К. Н. Куклин¹, С. В. Полосаткин^{1,2}**

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕКЦИОННОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МНОГОПРОВОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-3 *

Приводятся результаты экспериментов по инъекции в установку ГОЛ-3 графитовых макрочастиц массой ~10 мг. Показано, что ошибки позиционирования не приводят к неустойчивости плазмы. Измерена скорость распространения плотной плазмы вдоль магнитного поля и показано наличие торможения со временем.

Ключевые слова: плазма, многопроволочная ловушка, пеллет-инъекция.

Введение

Основной целью физической программы установки ГОЛ-3 [1] является исследование многопроволочной схемы удержания плазмы. Для дальнейшего повышения параметров требуется расширение рабочей области в сторону большей плотности плазмы. Простое повышение плотности напускаемого газа приводит к падению тока предварительного разряда, создающего стартовую плазму. Вследствие этого снижается степень начальной ионизации стартовой плазмы, ухудшаются условия для токовой нейтрализации релятивистского электронного пучка и в итоге развивается неустойчивость Крускала – Шафранова, сопровождающаяся аварийным сбросом пучка и плазмы на стенку [2]. Для обхода этого ограничения ранее было предложено использовать пеллет-инъекцию, которая применяется на ряде установок для подпитки плазмы веществом (см., например, [3]).

Отличием ГОЛ-3 от прочих установок с магнитным удержанием плазмы является

другой механизм образования плазменного сгустка из вещества инжектированной макрочастицы: практически мгновенное разрушение мишени при старте инъекции пучка с образованием плотного плазмоида, который затем расширяется вдоль магнитного поля и заполняет ловушку. Ранее пробные опыты проводились с диагностическими (примесными) макрочастицами малой массы [4]. Переход к вводу в плазму большого количества вещества может сопровождаться возникновением крупномасштабной неустойчивости транспортировки электронного пучка по плазме из-за асимметрии протекания обратного тока при внеосевой инъекции (которая и будет происходить из-за разброса при срабатывании пеллет-инжектора).

В работе будут представлены новые данные экспериментов по инъекции в плазму крупных примесных макрочастиц, обладавших массой ~ 10 мг. Основными задачами было выяснение устойчивости системы пучок-плазма при образовании внутри сгустка холодной плазмы, а также изучение процесса заполнения ловушки плотной плазмой.

* Работа выполнена при частной финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-02-17160а).

Постановка экспериментов

Установка ГОЛ-3 представляет собой многопробочную ловушку, в которой нагрев плазмы осуществляется сильноточным релятивистским электронным пучком ускорителя У-2. Дейтериевая плазма (длиной около 15 м и диаметром 41 мм в магнитном поле 3,2 Тл) с плотностью $\sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$ создается в разрядной камере, находящейся в гофрированном магнитном поле с $B_{\text{max}} / B_{\text{min}} = 4,8/3,2$ Тл и с периодом гофрировки 22 см. Далее в эту стартовую плазму инжектируется электронный пучок (0,8 МэВ, 30 кА, 8 мкс, ~ 120 кДж) и нагревает ее до температуры ~ 2 кэВ.

В ходе обсуждаемых экспериментов в среднюю по длине точку плазменного столба производилась инжекция сферических графитовых макрочастиц массой ~ 10 мг, которые превращались в плазму не полностью. Начальная скорость частиц была ~ 20 м/с, упреждение запуска инжектора было таким, чтобы обеспечить позиционирование крупинки по центру вакуумной камеры в нужный момент времени.

Дополнительные диагностики мишенной плазмы включали в себя цифровую фотокамеру с ЭОП и спектрометр видимого диапазона с пространственным и временным разрешением, направленные на точку инжекции макрочастиц, а также несколько других оптических, рентгеновских и спектральных систем, распределенных по длине установки. Распространение облака плотной холодной плазмы вдоль магнитного поля прослеживалось на дистанции до 5 м в обе стороны от места инжекции.

Устойчивость электронного пучка при инжекции макрочастиц

В установке ГОЛ-3 существенную роль играет продольный ток, текущий по плазме, который имеет сложное распределение по радиусу [2]. Инжектируемый ток электронного пучка в несколько раз превышает предел Крускала – Шафранова, при этом стабильное распространение пучка по плазме возможно исключительно благодаря тому, что поддерживается вынужденное протекание компенсирующего обратного тока по периферии плазменного шнура. Поэтому появление в плазменном столбе области плохой проводимости, занятой холодной плазмой, образо-

вавшейся в результате разрушения макрочастицы, может привести к перераспределению токов по сечению и в результате к срыву.

Реальная точность срабатывания системы пеллет-инъекции приводит к тому, что к моменту начала нагрева плазмы электронным пучком макрочастица оказывается в пределах окрестности ~ 2 см от оси. Соответственно есть асимметрия начального положения плотного холодного плазмоида в основной плазме (рис. 1). Упрощенно изображенную на рисунке систему можно представить как диполь, состоящий из двух разнонаправленных токов, разнесенных на dr . Соответственно на плазму должно действовать дополнительное магнитное поле этого диполя. В том случае, если бы проводимость основной плазмы определялась классическими формулами, из-за большой длины системы подобная асимметрия привела бы к выбросу пучка на стенку. Однако, как известно, в ходе коллективной релаксации электронного пучка в плазме возбуждается высокий уровень турбулентности, приводящий к возникновению аномально высокого сопротивления. В области плотной плазмы такая турбулентность не развивается. Поэтому реальная ситуация может быть лучше, чем оцененная по классическим формулам.

В эксперименте устойчивость транспортировки пучка по плазме оценивалась по сигналам поясов Роговского, расположенных в нескольких точках по длине установки и измерявших полный ток, протекавший по плазме. Использовались также данные других плазменных диагностик, которые могли свидетельствовать о контакте плазмы со стенкой. Оказалось, что до начала инжекции электронного пучка ток предваритель-

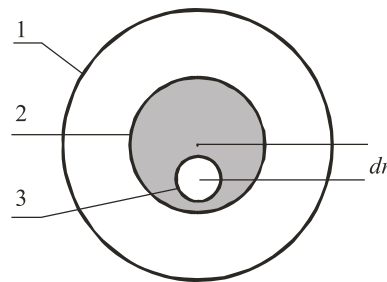


Рис. 1. Роль асимметрии инжекции:
1 — вакуумная камера; 2 — область основной плазмы;
3 — область плотной холодной плазмы;
 dr — ошибка позиционирования

ного разряда, создававшего стартовую плазму, практически совпадал в экспериментах с пеллет-инжекцией и без пеллет-инжекции. Таким образом, параметры стартовой плазмы были идентичными. После начала инжекции электронного пучка на сигналах поясов Роговского появлялось характерное изменение (рис. 2), однако характер этого измене-

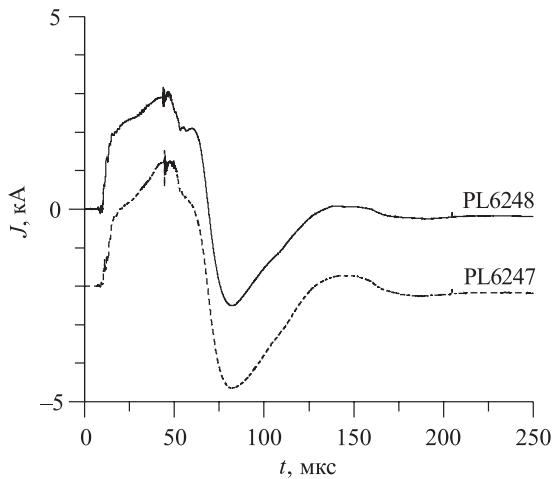


Рис. 2. Полный ток по плазменному столбу, измеренный на координате $Z = 634$ см: вверху – с пеллет-инжекцией, внизу – без пеллет-инжекции (сдвинуто для наглядности). Начало инжекции пучка в $t = 44,5$ мкс

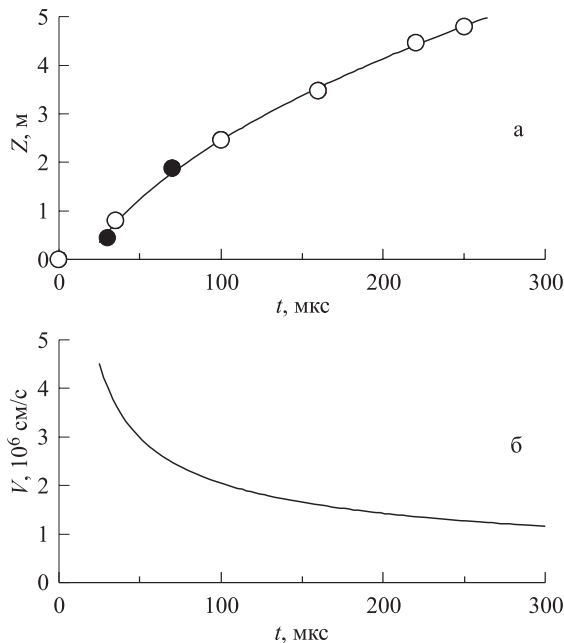


Рис. 3. Зависимость времени прихода плотной плазмы на разные расстояния от точки инжекции (а): ● – измерения по ходу пучка; ○ – измерения против хода пучка; линия – подгонка полиномом второго порядка; скорость распространения, полученная из аппроксимирующего полинома (б)

ния соответствовал тому, что было и в экспериментах без инжекции, а величина полного тока оставалась в безопасных пределах. Другие плазменные диагностики также свидетельствовали об устойчивом распространении пучка.

Таким образом, негативного влияния неточности позиционирования макрочастицы не отмечено. Этот факт может быть связан с тем, что появление в горячей плазме области, занятой плотной холодной плазмой, имеет менее выраженное влияние на полное распределение токов по сечению из-за наличия высокого уровня турбулентности во время пучкового нагрева, которая снижает пространственную неоднородность проводимости.

Скорость расширения мишенной плазмы

После разрушения макрочастицы за время ~ 2 мкс и образования плотного плазменного сгустка дальнейшее расширение плазмы происходит в два этапа. Первоначально плазма слабоионизирована, не замагничена и расширяется сферически-симметрично. В дальнейшем, после достижения плазменным сгустком определенного размера, он замагничивается и расширяется в основном вдоль силовых линий магнитного поля (для случая макрочастиц с массой ~ 100 мкг это было продемонстрировано в [4]). На этой стадии ускоряющийся разлет плазмоида хорошо описывается простым автомодельным решением, полученным в [5]. В случае более крупных макрочастиц, использовавшихся в настоящем эксперименте, количество превратившихся в плазму атомов углерода составляло $3 \cdot 10^{19}$, что приблизительно равно числу ионов во всем плазменном шнуре ГОЛ-3. Требовалось экспериментально выяснить, возможно ли торможение струи плотной плазмы и ее захват или же она выйдет из ловушки вдоль магнитного поля.

Для изучения распространения плотного сгустка вдоль магнитного поля использовались оптические и другие диагностики ГОЛ-3, на сигналах которых плотная плазма была заметна. Измерения плотности, проведенные на расстоянии 4,5 м от точки инжекции, показали плотность на фронте сгустка $6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, что соответствует расширению плотной плазмы без потерь частиц. На рис. 3 представлены данные о динамике распространения плотной

плазмы вдоль магнитного поля. Видно, что расширение симметрично относительно точки инъекции, что согласуется с автомоделным решением [5]. Однако в отличие от автомоделного решения только начальная фаза разлета проходит с ускорением.

По мере расширения плотная плазма постепенно замедляется. Это происходит под действием давления основной плазмы в ловушке. Поскольку длительность инъекции пучка много меньше времени разлета плазмоида, то одновременно уменьшается давление в сгустке в результате его расширения и уменьшается давление окружающей плазмы в результате ее остывания. Простая зависимость скорости от времени, получившаяся при подгонке, является, скорее всего, случайностью.

Заключение

Эксперименты по инъекции в плазму установки ГОЛ-3 углеродных макрочастиц с массой ~ 10 мг показали, что образовавшаяся из материала макрочастицы плотная плазма заполняет ловушку без потерь частиц. Скорость расширения со временем падает. Для захвата и удержания этой плазмы в ловушке достаточно будет, по-видимому, увеличить длительность инъекции электронного пучка, поддерживающего температуру в окружающей плазме. Транспортировка электронного пучка по плазме при смещенном позиционировании макрочастицы является устойчивой.

Развитием работ по инжекционному методу создания плотной плазмы в ГОЛ-3 является использование криогенной инъекции при помощи инжектора ITV-7, создаваемого совместно с СПбГПУ.

Список литературы

1. Burdakov A., Azhannikov A., Astrelin V. *et al.* Plasma heating and confinement in GOL-3 multimirror trap // Fusion Science and Technology. 2007. Vol. 51. No. 2. P. 106–111.
2. Postupaev V. V., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T. *et al.* Role of q -profile for plasma confinement in the multimirror trap GOL-3 // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 47. No. 1. P. 84–91.
3. Кутеев Б. В. Технология для термоядерных реакторов, базирующихся на инъекции макрочастиц // ЖТФ. 1999. Т. 69.
4. Акентьев Р. Ю., Аржанников А. В., Астрелин В. Т. и др. Экспериментальное исследование динамики испарения и разлета твердотельной крупинки в плазме, нагретой электронным пучком // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 1. С. 11–20.
5. Рютов Д. Д. Газодинамика плотных плазменных сгустков в соленоиде: Препр. / Институт ядерной физики СО АН СССР; № 90 –143. Новосибирск, 1990. 23 с.

Материал поступил в редакцию 14.12.2007