



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

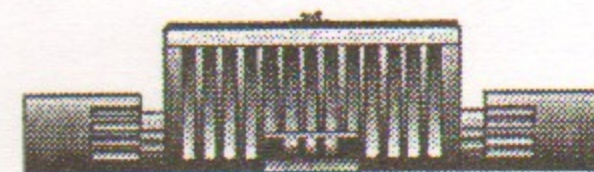
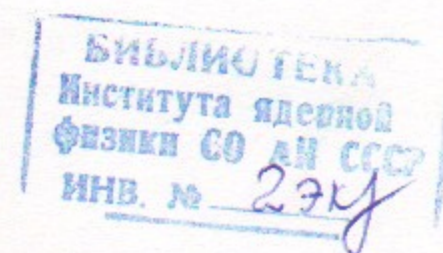
Б.91

А.В. Бурдаков, В.С. Койдан, В.В. Поступаев

**ИНЖЕКТОР КРУПИНОК
ДЛЯ УСТАНОВКИ ГОЛ-3-II**

ИЯФ 99-104

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК
1999

Инжектор крупинок для установки ГОЛ-3-II

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, В.В.Поступаев

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

Аннотация

Предложено проведение экспериментов с инъекцией крупинок вещества в плотную высокотемпературную плазму, получаемую на установке ГОЛ-3-II. Нагрев плазмы в соленоиде осуществляется мощным пучком релятивистских электронов (1 МэВ, 10 нс, 200 кДж). В результате коллективного взаимодействия пучка с плазмой с плотностью масштаба 10^{15} см⁻³ достигается электронная температура 1-2 кэВ. Инъекция крупинок вещества в такую плазму позволит решить ряд важных экспериментальных задач. Во-первых, крупинки будут использоваться как источник вещества для создания в горячей плазме компактных сгустков, имеющих плотность $10^{16}+10^{17}$ см⁻³. Во-вторых, по динамике облака испаренного вещества крупинки с применением различных диагностик можно получить информацию о локальных свойствах плазмы (коэффициенты переноса, потенциал плазмы и т.п.), о взаимодействии плазмы с поверхностью (динамика испарения и разлета). По сравнению с ранее применявшейся на установке технологией импульсного напуска газа инъекция крупинок позволит получать сгустки с резкой границей в поперечном сечении и расширит используемый элементный состав плазмы.

Описана конструкция инжектора крупинок для установки ГОЛ-3-II, приведены основные характеристики его работы.

Pellet injector for GOL-3-II facility

A. V. Burdakov, V. S. Koidan, V. V. Postupaev

Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk 630090, Russia

Abstract

A method of pellet injection is proposed for creation of dense plasma bunches for the GOL-3-II facility. Physical tasks and details of injector of pellets are discussed.

Введение

Одной из альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием является многопробочная ловушка, в которой для увеличения времени жизни плазмы магнитное поле имеет конфигурацию гофрированного соленоида [1]. В этой схеме для достижения реакторных параметров плазма должна иметь плотность выше 10^{17} см⁻³ и величину β больше 1. Возможность получения такой плазмы в настоящее время исследуется на установке ГОЛ-3-II [2,3], которая является единственной установкой, параметры которой позволяют моделировать физические процессы, типичные для многопробочной системы с субтермоядерной плазмой.

Работы на установке ГОЛ-3-II проводятся в основном с целью изучения физики получения и удержания плотной горячей плазмы в многопробочной магнитной ловушке. Кратко рассмотрим основные физические процессы, определяющие поведение плазмы на установке. Водородная или дейтериевая плазма, имеющая плотность от 10^{14} до 10^{16} см⁻³, создается при помощи прямого разряда в продольном магнитном поле. Длина плазменного столба ~ 12 м, диаметр 6 см. Магнитное поле до 5 Тл создается соленоидом, конструкция которого позволяет работать либо в конфигурации одиночного классического пробкотрона с полем в концевых пробках до 11 Тл, либо с гофрировкой поля на части магнитной системы. Для нагрева плазмы в соленоиде в нее инжектируется мощный релятивистский электронный пучок (энергия ~ 1 МэВ, ток ~ 30 кА, длительность до 10 мкс, энерго-содержание за импульс - до 200 кДж).

В результате коллективного взаимодействия пучка с плазмой в ней возбуждаются резонансные с пучком ленгмюровские колебания, которым пучок передает часть своей энергии. Затем в результате нелинейной релаксации этих колебаний происходит нагрев электронов плазмы. Экспериментально показано, что пучок может терять до 30-40% своей энергии при прохождении через плазменный столб длиной 12 м. Электронная температура плазмы при плотности 10^{15} см⁻³ может достигать 2 кэВ. В этом режиме ионная температура остается небольшой из-за короткого времени существования горячей плазмы.

При увеличении плотности плазмы эффективность релаксации пучка уменьшается, падает электронная температура. В то же время для работы в режиме многопробочного удержания нужна плотность

$10^{16}-10^{17}$ см⁻³, т.е. слишком высокая для эффективной релаксации пучка за счет коллективных эффектов. Для достижения высокой плотности горячей плазмы на установке ГОЛ-3 впервые был реализован т.н. метод двухступенчатого нагрева плотной плазмы [4]. Суть метода в том, что в основной плазме (с плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³) создается плазменный сгусток с плотностью $10^{16}+10^{17}$ см⁻³. Основная плазма нагревается за счет эффективной коллективной релаксации электронного пучка, а затем передача энергии от горячей основной плазмы к плотному сгустку за счет парных столкновений. Эксперименты по этой схеме проводились с использованием импульсного напуска газа для формирования требуемого профиля плотности по длине установки. Было получено увеличение давления в плотной плазме до 3-х раз по сравнению с давлением однородной плазмы оптимальной плотности. Ионная температура при большой плотности близка к электронной (измерена ионная температура до 150 эВ при плотности выше $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³).

Проведенные эксперименты показали работоспособность схемы двухступенчатого нагрева плотной плазмы. В то же время методика импульсного напуска газа имеет ряд ограничений:

- а) плотным газом заполняется все сечение камеры, а не только область, занятая горячим плазменным шнуром. Большое количество нейтрального газа на периферии приводит к росту перезарядных потерь, потерь на ионизацию, к охлаждению периферии плазмы;
- б) наличие плотной и холодной периферии плазмы затрудняет или делает невозможным использование ряда традиционных методов диагностики (анализ нейтралов перезарядки, анализ интенсивности и профиля спектральных линий);
- в) рост плотности нейтрального газа приводит к ухудшению работы прямого разряда, создающего исходную плазму. При увеличении плотности выше некоторой степень начальной ионизации плазмы становится незначительной. Это приводит к ухудшению компенсации тока электронного пучка при его транспортировке через систему. Большой нескомпенсированный ток пучка приводит (при превышении предела Шафранова-Крускала) к потере макроскопической устойчивости пучка;
- г) ограничен элементный состав газов, с которыми можно работать по такой схеме.

Преодолеть указанные ограничения метода импульсного напуска газа в наших условиях можно, если перейти к созданию плотных плазменных сгустков методом инъекции крупинок.

Инъекция крупинок в плазму

Рассмотрим процессы, происходящие при использовании крупинки для создания плотных плазменных сгустков на установке ГОЛ-3-II. Крупинка вещества с числом атомов масштаба 10^{20} вводится в определенную точку по сечению плазменного столба. Под действием потока горячих электронов начинается испарение и ионизация крупинки, при этом плотный слабоионизированный пар может распространяться на некоторое расстояние и поперек магнитного поля (простые оценки, основанные на результатах работы [5], дают величину диаметра плотного плазменного шара около 1 см через 1 мкс после начала облучения). После полной ионизации плотная плазма становится замагниченной, дальше ее нагрев и расширение происходит так же, как в упомянутой выше двухступенчатой схеме. Такой способ получения плотного плазменного сгустка лишен перечисленных выше недостатков импульсного газонапуска. Помимо задачи получения плотного сгустка с высоким давлением плазмы, предложенную технологию можно использовать и в диагностических целях, вводя в плазму относительно небольшое количество известной примеси.

Методика инъекции крупинки вещества в плазму известна и используется на ряде крупных токамаков для подпитки плазмы веществом, управления плотностью на периферии и для целей диагностики (см., напр., обзоры [6-7]). Однако криогенные инжекторы крупинки изотопов водорода являются дорогостоящими устройствами. Диапазон физических параметров, характерных для установки ГОЛ-3-II, позволяет предложить другой подход к методике инъекции крупинки в плазму и значительно упростить и удешевить необходимое оборудование. Время нагрева плазмы мало, поэтому крупинку можно инжектировать в нужную точку к началу разряда, исключая ее транспортировку сквозь горячую плазму (снижается необходимая начальная скорость инъекции, исключается испарение наружных слоев крупинки на периферии). Удельная мощность нагрева плазмы составляет по порядку величины 10^9 Вт/см², соответственно радиационные потери плазмы не являются определяющими даже при высокой концентрации примесей. Поэтому

предлагается в обсуждаемой системе отказаться от криогенной техники и инжектировать крупинки из твердых водородосодержащих веществ (полимеры, гидрид лития и т.п.). Крупинки для диагностических целей могут быть с практически любым химическим составом.

Конструкция инжектора крупинок

Для создания инжектора крупинок была выбрана электродинамическая схема. Параметры системы определялись следующими техническими требованиями: независимость работы системы от материала и веса (в пределах 0.1÷10 мг) крупинки, возможность проведения нескольких импульсов без нарушения вакуума, точная синхронизация с остальными системами установки.

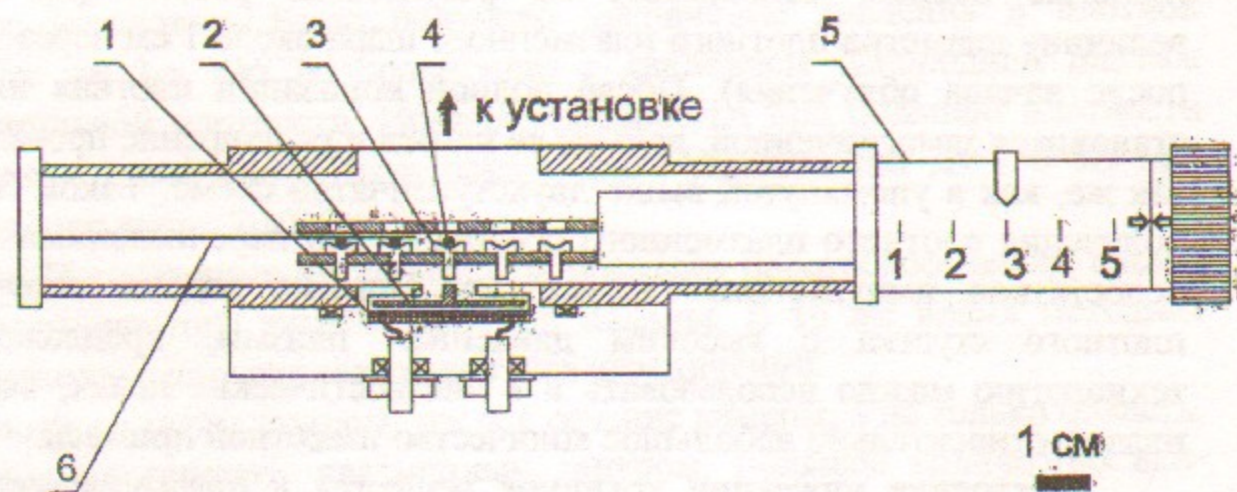


Рис.1. Устройство инжектора крупинок. Цифрами обозначены: 1 - катушка, 2 - диск-толкатель, 3 - боек, 4 - крупинка, 5 - микрометрический винт с кассетой на 5 крупинок, 6 - упругая крышка.

Схематически устройство инжектора приведено на рис.1. Электродинамическая система состоит из плоской катушки 1 и диска-толкателя 2. При протекании импульса тока по катушке в диске-толкателе наводятся токи отражения и он ускоряется, отталкиваясь от спирали (на рисунке - вверх). Инжектор предусматривает возможность проведения пяти последовательных опытов без разгерметизации установки. При этом крупинка 4 помещается в углубление бойка 3, а боек подается на рабочую позицию при помощи микрометрического

винта 5. Далее диск-толкатель ударяет по бойку и, таким образом, сообщает крупинке начальную скорость. После разгона крупинки диск-толкатель и боек тормозятся при ударе об отражатель, а крупинка продолжает полет. Выбрана схема с жестким торможением бойка для того, чтобы гарантировать отрыв крупинки от его поверхности. Для того, чтобы исключить потерю крупинок при вибрации, возникающей в момент срабатывания установки, предусмотрена упругая крышка 6, закрывающая еще не сработавшие элементы.

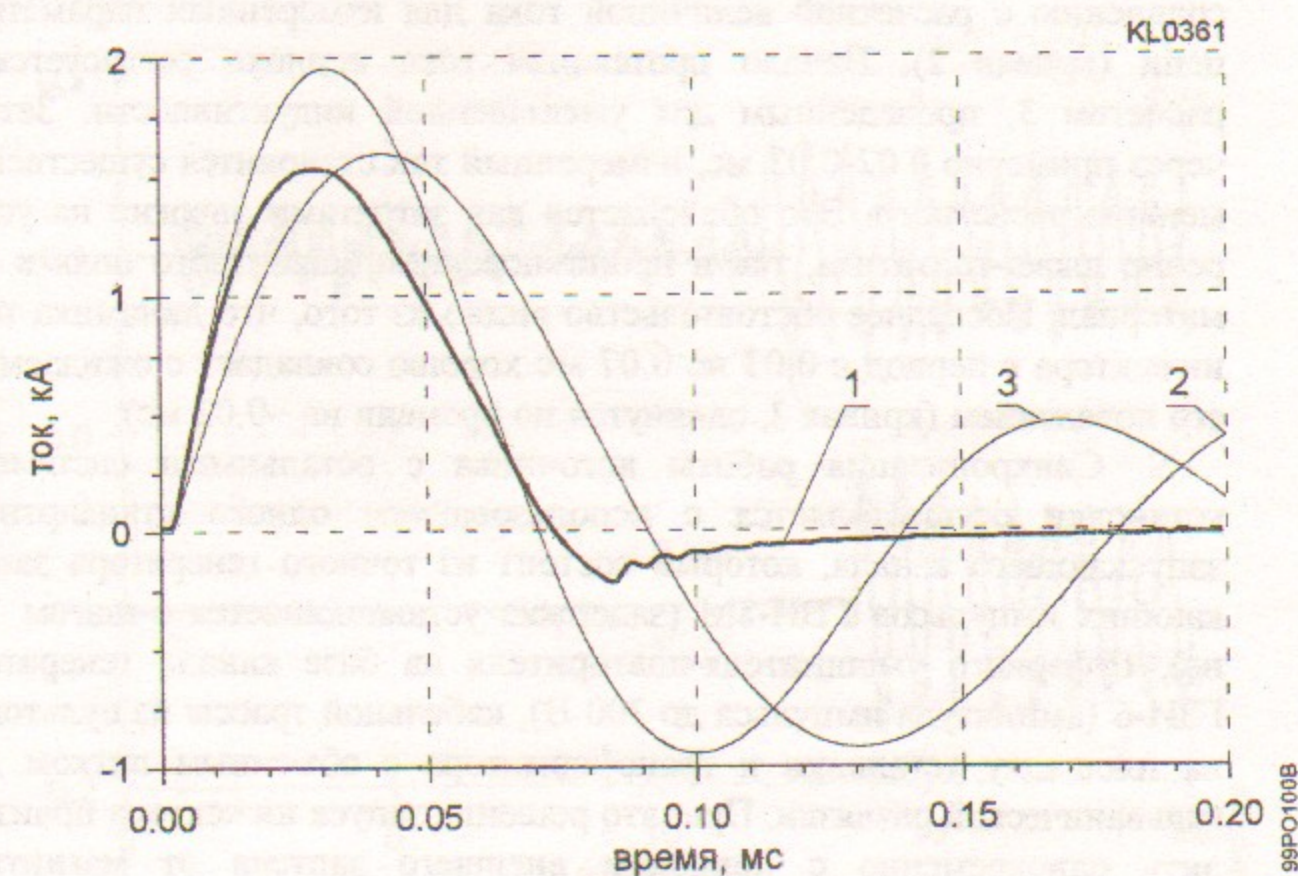


Рис.2. Ток питания инжектора крупинок. Обозначены кривые: 1 - измерено при напряжении зарядки 353 В; 2 - расчет для измеренной индуктивности катушки 4.8 мкГн; 3 - расчет для уменьшенной за счет токов отражения индуктивности 2.8 мкГн.

Питание катушки инжектора осуществляется от простого источника, состоящего из конденсатора типа МБГВ (160 мкФ, 500 В) и тиристорного ключа. На рис.2 приведена типичная осциллограмма тока через катушку в сравнении с расчетной величиной. Параметры электрической цепи были выбраны так, чтобы длительность

протекания тока (напомним, что тиристорный ключ оставляет только одну полуволну питающего тока) была по порядку величины равна времени проникновения магнитного поля в материал диска-толкателя (т.е. толщина диска несколько меньше толщины скин-слоя). При этом получается оптимальное соотношение между предельным темпом ускорения и требуемым энергозапасом в конденсаторе. Из рисунка 2 видно, что наведенные в диске-толкателе токи отражения заметно изменяют индуктивность катушки (период протекания тока на кривой 1) по сравнению с расчетной величиной тока для измеренных параметров цепи (кривая 2). Начало протекания тока неплохо согласуется с расчетом 3, проведенным для уменьшенной индуктивности. Затем, через примерно 0.02-0.03 мс, измеренный ток становится существенно меньше расчетного. Это объясняется как затратами энергии на ускорение диска-толкателя, так и проникновением магнитного поля в его материал. Последнее обстоятельство видно из того, что динамика тока инжектора в период с 0.03 по 0.07 мс хорошо совпадает с ожидаемым его поведением (кривая 2, сдвинутая по времени на ~ 0.02 мс).

Синхронизация работы источника с остальными системами установки осуществляется с использованием одного стандартного запускающего канала, который состоит из точного генератора запускающих импульсов ГВИ-8М (задержка устанавливается с шагом 100 нс), буферного усилителя-повторителя на базе канала генератора ГЗИ-6 (амплитуда импульса до 300 В), кабельной трассы из пультровой на площадку установки и трансформатора с объемным витком для гальванической развязки. Принято решение запуск инжектора производить одновременно с приходом внешнего запуска от магнитной системы установки (условный ноль отсчета времени на установке), при этом в нужной точке камеры крупинка должна оказаться в момент 13530 мкс (начало инъекции пучка). Такой выбор позволяет снять вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью инжектора с мощными импульсными системами установки и влиянием вибрации на траекторию крупинки.

Испытания инжектора на установке ГОЛ-3-II

Инжектор крупинок был установлен в окно диагностического промежутка между 59 и 60 катушками соленоида ГОЛ-3-II (расстояние от центра входной пробки, принятого за начало координат, равно 662

см). Для отработки инжектора в центре камеры был смонтирован детектор прилета крупинки, который представлял собой пьезоэлектрический датчик, закрепленный на гибкой подвеске для защиты от посторонних вибраций. Сигнал этого детектора подавался непосредственно на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП-101S (10 бит, до 1 мкс/отсчет). Запуск АЦП производился одновременно с запуском инжектора крупинок.

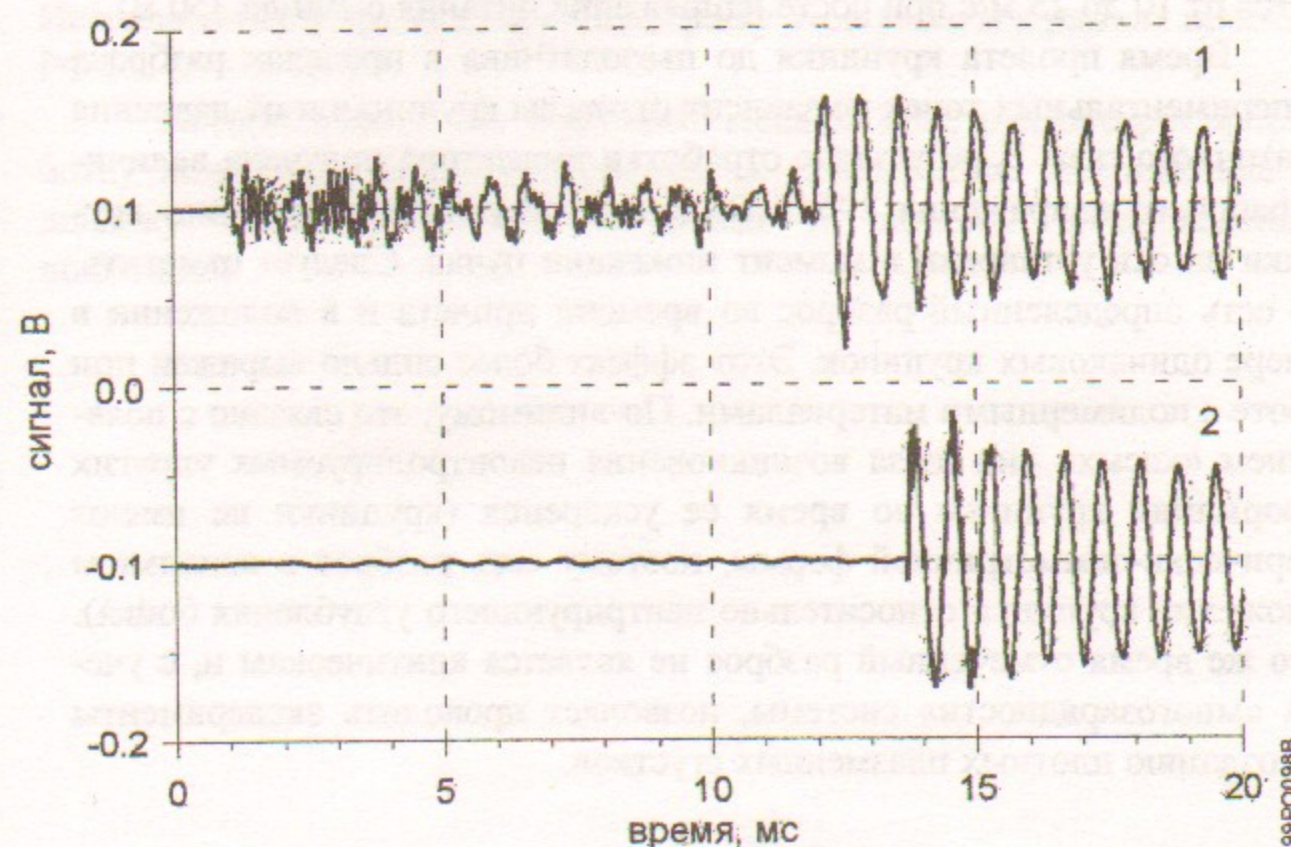


Рис.3. Сигналы пьезоэлектрического детектора крупинок (для наглядности сдвинуты относительно нулевого уровня). Осциллограмма 1 - крупинка 0.4 мг полиэтилена, напряжение зарядки 350 В, атмосферное давление; осциллограмма 2 - крупинка 1 мг полиэтилена, напряжение зарядки 295 В, вакуум.

При отладке инжектора он испытывался с крупинками из материалов, имеющих плотность от ~ 1 г/см³ (полиэтилен) до ~ 9 г/см³ (медь). Масса крупинок варьировалась от 0.2 до 10 мг. На рис.3 приведены типичные сигналы пьезоэлектрического датчика. Первый шумообразный всплеск на сигнале через ~ 1 мс после запуска соответствует приходу звуковой волны, возбуждаемой вибрацией, возник-

кающей при срабатывании электродинамической системы инжектора. Эта часть сигнала отчетливо проявляется при работе инжектора при атмосферном давлении, и практически исчезает при переходе к «вакуумному» режиму с водородом рабочей концентрации $\sim 10^{15}$ см⁻³. Основной сигнал появляется в момент удара крупинки, в результате чего возбуждаются колебания на собственной частоте пьезодатчика. Амплитуда колебаний зависит от массы и скорости крупинки (которая изменяется от 10 до 25 м/с при росте напряжения питания с 200 до 350 В).

Время пролета крупинки до пьезодатчика в пределах разброса экспериментальных точек не зависит от массы крупинки и от давления остаточного газа. В результате отработки инжектора получена величина рабочего напряжения 295 ± 5 В, соответствующая положению крупинки на оси установки в момент инжекции пучка. Следует отметить, что есть определенный разброс во времени прилета и в положении в камере одинаковых крупинок. Этот эффект более сильно выражен при работе с полимерными материалами. По-видимому, это связано с появлением «косых» сил из-за возникновения неконтролируемых упругих деформаций крупинки во время ее ускорения (крупинки не имеют сферически-симметричной формы, поэтому есть разброс в начальном положении крупинки относительно центрирующего углубления бойка). В то же время отмеченный разброс не является критическим и, с учетом «многозарядности» системы, позволяет проводить эксперименты по созданию плотных плазменных сгустков.

Заключение

В результате проведенных работ сконструирован, изготовлен и отлажен непосредственно на установке ГОЛ-3-II инжектор крупинок, который позволяет инжектировать в заданную точку по радиусу плазменного столба крупинку из твердого вещества. Отработана инжекция крупинок с массой 0,2 мг и выше, что является достаточным для создания плотного плазменного сгустка.

После этапа отработки методики инъекции крупинок планируется этап физических экспериментов по нескольким направлениям:

а) получение плотного плазменного сгустка с максимальной величиной β ;

б) использование маленьких крупинок в качестве диагностической примеси для определения локальных параметров плазмы;

в) использование крупинок с заданным элементным составом для создания излучающего сгустка многозарядных ионов.

В ходе этих работ будет проводиться набор и систематизация экспериментальных результатов в разных режимах работы установки, включая разработку новых специализированных методик диагностики плазмы.

Благодарности

Авторы благодарны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку этой работы в рамках проекта РФФИ-99-02-16728.

Авторы благодарят В.С. Николаева за конструкторскую проработку инжектора, В.А. Расторопова за качественное изготовление и доводку инжектора, Р.Ю. Акентьева за помощь в проведении испытаний.

Литература

1. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы // Письма в ЖЭТФ, т.14, с.320 (1971).
2. Agafonov M.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Bobylev V.B., Burdakov A.V., Chagin M.N., Deulin Yu.I., Khilchenko A.D., Khilchenko V.V., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Kvashnin A.N., Lee O.A., Makarov A.G., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Perin S.S., Postupaev V.V., Razilov R.V., Rovenskikh A.F., Semenov E.P., Sinitskij S.L., Tarasov A.V., Tsigutkin K.V., Yushkina L.V., Zotkin R.P. *Plasma heating by high-energy content microsecond electron beam at GOL-3-II facility* // Plasma Physics and Contr. Fusion, Vol.38, No.12A, p.A93 (1996).
3. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Ivanenko V.G., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Makarov A.G., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Perin S.S., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L. *Recent results on the GOL-3-II facility* // Transactions of Fusion Technology, Vol.35, No.1T, p.112 (1999).
4. Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Койдан В.С., Меклер К.И., Мельников П.И., Поступаев В.В., Щеглов М.А. Эксперименты по двухступенчатому нагреву плотной плазмы на установке ГОЛ-3 // ЖЭТФ, т.113, с.897 (1998).
5. Astrelin V.T., Burdakov A.V., Chebotaev P.Z., Filippov V.V., Koidan V.S., Mekler K.I., Melnikov P.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Shcheglov M.A., Wuerz H. *Hot electron target interaction experiments at the GOL-3 facility* // Nuclear Fusion, Vol.37, p.1541 (1997).
6. Milora S.L., Houlberg W.A., Lengyel L.L., Mertens V. *Review of pellet fueling* // Nuclear Fusion, Vol.35, p.657 (1995).
7. Kuteev B.V. *Pellet technologies for plasma fuelling and diagnostics* // Transactions of Fusion Technology, Vol.35, No.1T, p.205 (1999).

А.В. Бурдаков, В.С. Койдан, В.В. Поступаев

Инжектор крупинки для установки ГОЛ-3-II

A.V. Burdakov, V.S. Koidan, V.V. Postupaev

Pellet injector for GOL-3-II facility

ИЯФ 99-104

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 9.12. 1999 г.

Сдано в набор 28.12.1999 г.

Подписано в печать 28.12.1999 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 104

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.