



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

28

А.А. Иванов, В.Г. Соколов, Г.И. Фиксель,  
С.Ю. Таскаев, В.Е. Чуприянов

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
МИШЕННОЙ ПЛАЗМЫ  
В УСТАНОВКЕ АМБАЛ

ПРЕПРИНТ 86-47

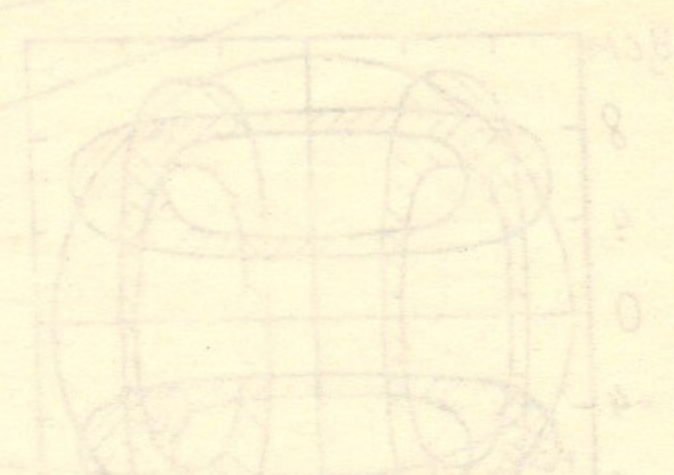


НОВОСИБИРСК  
1986

## АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследовано заполнение пробкотрона с  $\pi$ и $\nu$ -В и магнитным полем в пробке до 1,5 Т плазмой, создаваемой плазменной пушкой с собственным магнитным полем  $\sim 0,5$  Т. Плазменная струя, имеющая на выходе из пушки кольцевую структуру, перед входом в пробкотрон проходила через область слабого магнитного поля  $\sim 0,03$ — $0,04$  Т. После прохождения пробки кольцевая структура струи разрушалась, однако, сечение плазмы в центре пробкотрона примерно соответствовало магнитному потоку, выходящему из плазменной пушки. Измеренная плотность плазмы в центре ловушки составляла более  $2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ , а электронная температура 15—20 эВ. Измерено 30%-ое ослабление пучка атомов водорода с энергией 15 кэВ, проходящего через плазму.

© Институт ядерной физики СО АН СССР



Накопление горячей плазмы в открытой магнитной ловушке АМБАЛ [1] предполагается осуществлять путем инъекции пучков атомов водорода с энергией 20—25 кэВ в относительно холодную мишенную плазму, которая создается четырьмя кольцевыми пушками [2, 3], установленными попарно в торцевых баках. Собственное магнитное поле ловушки в области плазменных пушек имеет величину  $\sim 0,01$  Т.

Генерируемая пушкой плазменная струя имеет в начальном сечении вид кольца с наружным диаметром 13 см и толщиной  $\sim 1$  см. В зависимости от режима работы пушки, плотность плазмы в этой области составляет  $10^{14}$ — $10^{15}$  см $^{-3}$ , а электронная температура достигает 40 эВ. В оптимальном для создания мишенной плазмы режиме плотность плазмы в струе на выходе из пушки составляет  $2$ — $5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ , а электронная температура 10—20 эВ. Экспериментально установлено, что в этом режиме плазма имеет высокую степень ионизации (более 99%), а в ионном потоке содержится менее 5% тяжелых примесей. Эксперименты по инъекции в такую плазму пучка атомов водорода с энергией 9—15 кэВ показали, что время торможения захваченных протонов значительно меньше времени перезарядки на остаточном газе [2, 3]. Следовательно, генерируемая пушкой плазма обладает вполне удовлетворительными мишенными свойствами для создания, с помощью атомных пучков, горячей плазмы в установке АМБАЛ.

При проектировании системы создания мишенной плазмы предполагалось, что плазма движется вдоль силовых линий магнитного поля. Поэтому, для согласования магнитного потока, выходящего из кольцевого газоразрядного канала пушки, с заданными разме-

рами плазменной струи в центре пробкотрона каждая плазменная пушка помещалась в импульсный соленоид с полем до 0,6 Т. Расчетная форма сечения струй мишенной плазмы в центральной плоскости пробкотрона при магнитных полях в центре пробкотрона

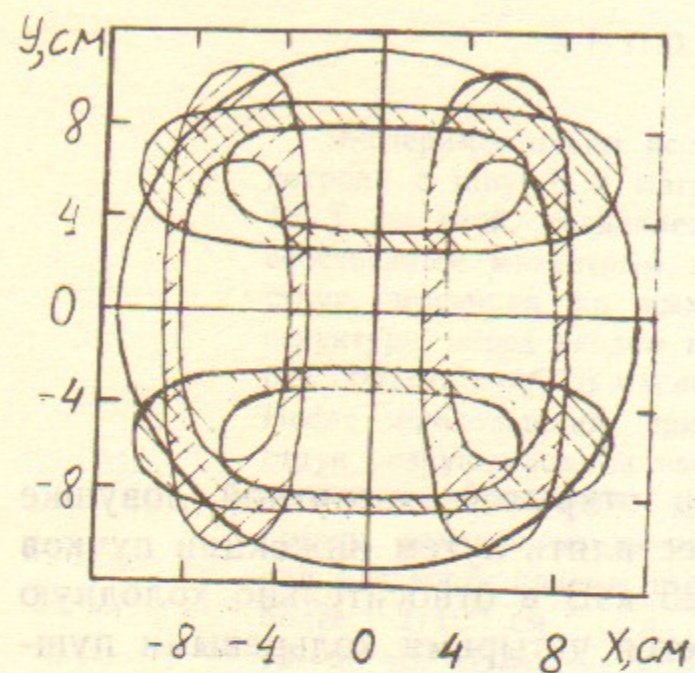


Рис. 1. Форма сечений струй мишенной и основной плазмы в центральной плоскости пробкотрона. (Магнитное поле в центре пробкотрона 1,5 Т, в соленоиде пушек 0,5 Т).

1,5 Т и соленоидах пушек 0,5 Т представлена на рис. 1. На этом же рисунке показано сечение горячей плазмы в ловушке.

Экспериментальная проверка расчетов осуществлялась непосредственно на установке АМБАЛ трассировкой силовых линий магнитного поля электронным пучком по методике, описанной в [4]. Для этого электронная пушка была установлена в соленоид плазменной пушки и с помощью координатного механизма перемещалась по окружности, соответствующей начальному сечению плазменной струи. В центральной плоскости пробкотрона координаты пучка регистрировались с точностью  $\pm 2$  мм. Измерения

дали согласие с расчетами в пределах 6 мм.

На рис. 2 показаны сечения в двух плоскостях силовой трубки магнитного поля, транспортирующего струю мишенной плазмы. Видно, что в выбранной схеме заполнения имеется участок относительно слабого магнитного поля 0,03—0,04 Т, расположенного перед пробкой ловушки с полем до 2 Т. Как было показано в экспериментах, проведенных на установке, описанной в работах [2, 3], наличие такого магнитного барьера может привести к ряду эффектов, вследствие которых плотность плазмы в струе за пробкой значительно уменьшится.

Для проверки системы получения мишенной плазмы и ее взаимодействия с инжектируемыми высокоэнергетичными пучками атомов водорода в реальных условиях установки АМБАЛ нами был поставлен эксперимент, схема которого представлена на рис. 3. К южному пробкотрону (1) были пристыкованы бак торцевого приемника плазмы (2), инжекторные баки (3), переходная

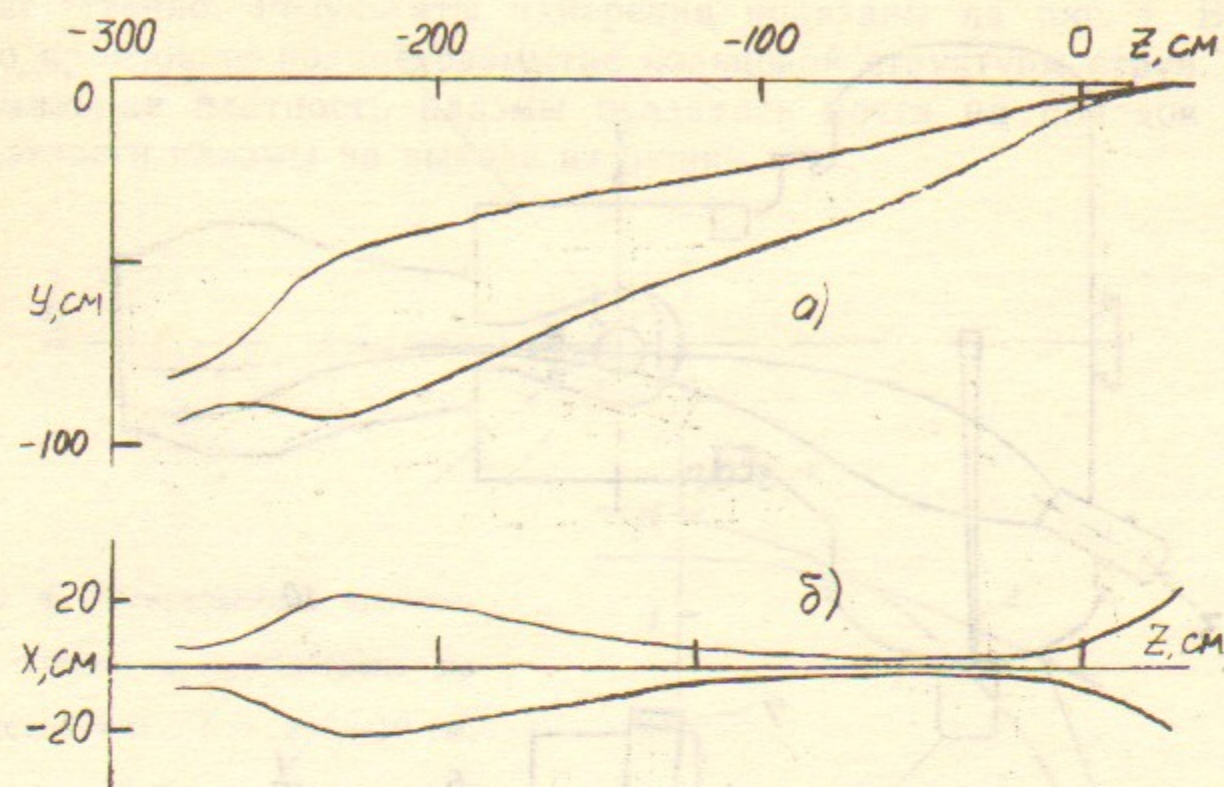


Рис. 2. Сечения силовой трубки магнитного поля, транспортирующего струю мишенной плазмы.

а) вертикальная плоскость, б) горизонтальная плоскость.

система (4), центральная камера (5) и бак крионасоса (6). В южном баке торцевого приемника плазмы была установлена одна плазменная пушка (13), а в баке крионасоса—протонный инжектор СТАРТ-2 (7) [5]. Энергия протонного пучка составляла 15 кэВ. Магнитные поля в пробкотроне и соленоиде плазменной пушки были установлены 1,5 Т и 0,5 Т, соответственно. Переходная система и центральная камера служили буферным объемом. Остаточное давление составляло  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  Тор.

Для измерения параметров плазмы в пробкотроне были установлены диамагнитная петля (10), перемещаемый двойной ленгмюровский зонд (11) и рупорные антенны (12) для определения плотности плазмы по СВЧ-отсечке на 4 и 8 мм. Линейная плотность определялась по ослаблению пучка атомов из источника СТАРТ-2, пересекавшего плазму.

Измерение распределения плотности плазмы в пробкотроне производилось двойным ленгмювским зондом, перемещаемым в горизонтальном (ось  $x$ ) направлении на расстоянии  $z = -2$  см и  $z = -10$  см от центральной плоскости пробкотрона. Вертикальная ( $y$ ) координата зонда устанавливалась равной расчетной коорди-

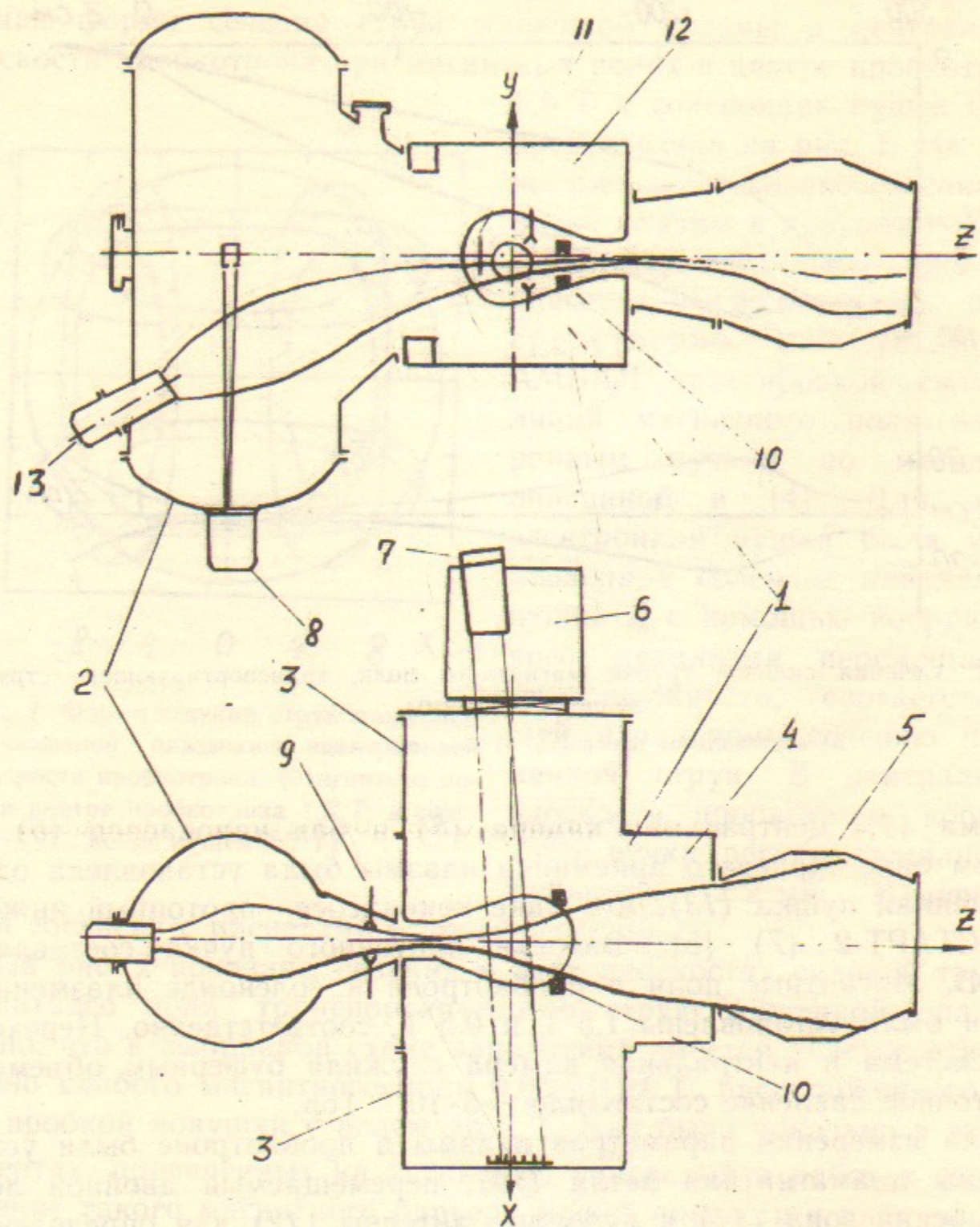
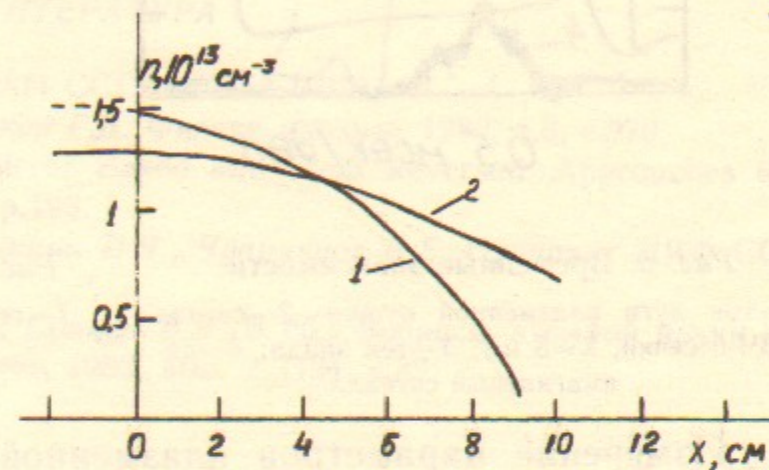


Рис. 3. Схема эксперимента.

1—пробкотрон, 2—бак торцевого приемника плазмы, 3—инжекторные баки, 4—переходная камера, 5—центральная камера, 6—бак крионасоса, 7—инжектор СТАРТ-2, 8—диагностический источник ДИНА, 9, 12—рупорные антенны СВЧ, 10—диамагнитная петля, 11—двойной ленгмюровский зонд, 13—плазменная пушка.

нате центра плазменной струи и составляла  $-6$  см и  $-10$  см, соответственно. Результаты измерения показаны на рис. 4. Видно, что произошло полное размытие кольцевой структуры струи. Максимальная плотность плазмы оказалась почти на порядок ниже плотности плазмы на выходе из пушки.

Рис. 4. Распределение плотности плазмы в пробкотроне на расстоянии: 1 —  $z = -10$  см, 2 —  $z = -2$  см от центральной плоскости.



На рис. 5 показаны временные зависимости тока дуги плазменной пушки, ионного тока насыщения ленгмюровского зонда, диамагнитного сигнала и сигнала СВЧ-отсечки на 8 мм, измеренных в центральной плоскости пробкотрона. Полная СВЧ-отсечка соответствует плотности плазмы  $2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . На рис. 6 показан сигнал СВЧ-отсечки на 4 мм. Модулированный характер сигнала говорит о том, что максимальная плотность плазмы находится вблизи границы отсечки, что соответствует  $8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . Следует отметить значительный уровень колебаний в плазме на частотах в несколько сот килогерц, которые наблюдались также на диамагнитном сигнале и в токе зонда, где уровень модуляции достигал 100%. По-видимому, это и объясняет некоторое расхождение результатов измерений максимальной плотности зондами и СВЧ-отсечкой.

Линейная плотность плазмы в центральной плоскости пробкотрона, рассчитанная по ослаблению пучка атомов водорода из инжектора СТАРТ-2 (до 30%), составила  $4 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ . Близкую к этой величину дают и зондовые измерения:  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  при  $z = -2$  см и  $2 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  при  $z = -10$  см.

Электронная температура плазмы по данным зондовых измерений и по диамагнитному сигналу составляла 15—20 эВ.

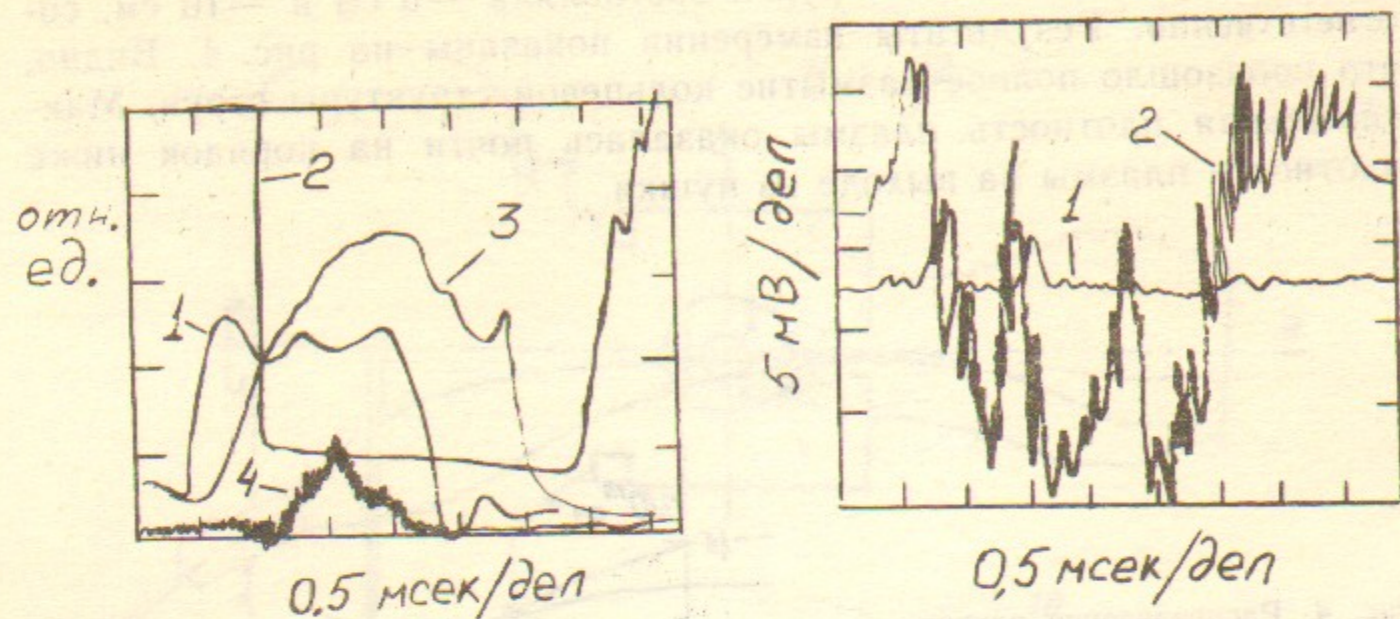


Рис. 5. Временные зависимости:

1—ток дуги плазменной пушки; 2—сигнал СВЧ-отсечки,  $\lambda=8$  мм; 3—ток зонда; 4—диамагнитный сигнал.

Рис. 6. Сигнал СВЧ-отсечки,  $\lambda=4$  мм:

1—генератор СВЧ выключен; 2—генератор СВЧ включен.

Измерение параметров плазменной струи до пробки проводилось по ослаблению пучка атомов водорода и гелия из диагностического инжектора ДИНА (8) (см. рис. 3), установленного на нижнем фланце торцевого приемника плазмы и по СВЧ-отсечке (9) на 4 и 8 мм. Измеренное более чем 10-кратное ослабление пучка атомов водорода и 3, 5-кратное ослабление пучка атомов гелия дает величину линейной плотности плазмы  $10^{16}$  см $^{-2}$ . Результаты модельных экспериментов на стенде [2, 3] показывают, что до входа в пробку кольцевая структура плазменной струи сохраняется. В этом предположении, плотность плазмы в струе составляет  $2 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ . Полная отсечка СВЧ-излучения на длине волны 4 мм указывает, что плотность плазмы перед входом в пробку не менее  $8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ .

Таким образом, в исследуемой геометрии магнитного поля параметры плазмы резко меняются после прохождения магнитной пробки. Наблюдается значительное падение максимальной плотности, разрушается кольцевая структура плазменной струи. Положение центра струи, а также ее поперечные размеры примерно согласуются с магнитным потоком, выходящим из плазменной пушки. Экспериментально измеренные электронная температура  $T_e=15-20$  эВ и линейная плотность плазмы  $nl=3-4 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  позволяют нам сделать выводы, что полученная плазма обладает вполне удовлетворительными мишенными свойствами для накопле-

ния горячей плазмы в установке АМБАЛ. Измеренное 30% ослабление (при прохождении мишенной плазмы) пучка атомов водорода с энергией 15 кэВ подтверждает сделанные выводы.

Авторы выражают благодарность Г. И. Димову за интерес к работе и полезные обсуждения, В. И. Давыденко, Е. А. Гилеву, А. В. Кабанцеву, В. М. Карлинеру, Ю. В. Коваленко за помощь в проведении экспериментов и коллективу лаборантов и механиков лаборатории 7 за сборку экспериментальной установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Димов Г.И. Препринт ИЯФ СОАН СССР 80-152, 1970.
2. Димов Г.И., Иванов А.А., Росляков Г.В. Физика плазмы, 1982, т.8, с.970.
3. Иванов А.А. Proc. Cours on Mirror Based and Field Reversed, Approaches to Magnet. Fusion. Varenna, 1983, p.193.
4. Белкин В.С., Соколов В.Г., Тимошин И.Я., Чуприянов В.Е. Препринт ИЯФ СОАН СССР 85-109, 1985.
5. Давыденко В.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. В сб.: Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез, 1983, вып. 2 (12), с.87.

*А.А. Иванов В.Г. Соколов, Г.И. Фиксель,  
С.Ю. Таскаев, В.Е. Чуприянов*

**Получение и исследование мишенной плазмы  
в установке АМБАЛ**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 16 января 1986 г.  
Подписано в печать 10.03.1986 г. МН 11687.  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 47

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*