

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

А. А. Кабанцев, В. Г. Соколов, С. Ю. Таскаев

ГАЗОВАЯ САМОИЗОЛЯЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

ИЯФ 99-2

Новосибирск
1999

Газовая самоизоляция плазменной струи

А. А. Кабанцев, В. Г. Соколов, С. Ю. Таскаев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия
taskaev@inp.nsk.su

В экспериментах на пробкотроне АМБАЛ-Ю было обнаружено, что на начальном этапе в горячей плазменной струе, являющейся мишенью для захвата инжектируемых атомарных пучков, концентрация атомарного холодного водорода практически не зависит от давления газа в установке. В данной работе приводятся экспериментальные результаты и физические оценки, позволяющие объяснить наблюдаемое. Вблизи дугового источника плазмы в результате взаимодействия ионов плазменной струи с газом формируется экранирующий поток быстрых атомов, который окружает плазменную струю и защищает её от проникновения внешнего холодного газа.

Gas self-insulation of plasma jet

A. A. Kabantsev, V. G. Sokolov, and S. Yu. Taskaev

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia
taskaev@inp.nsk.su

It was found experimentally that density of gas in a plasma jet doesn't change, whereas density of gas outside the jet increases considerably. Experimental results, physical estimations, and explanation of this phenomena have been presented.

Fast neutral flow is form by gas-plasma cloud at the exit of the plasma gun by charge-exchange of the plasma jet ions with Frank-Condon hydrogen atoms made as a result of dissociation of the hydrogen molecules. This fast neutral flow accompanies the plasma jet and screens one from the outhter cold gas.

АМБАЛ-Ю [1] — это классический квадрупольный пробкотрон с пробочным отношением 2 и расстоянием между пробками 1 м. Инжекция пучков атомов водорода энергией 16 кэВ, током до 160 экв. А, в течение 200 мкс ведётся в пробкотрон перпендикулярно оси. Пробкотрон предварительно заполняется водородной плазмой плотностью $2,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, характерной температурой 10 эВ с помощью «щелевой» плазменной пушки [2], расположенной в запробочной области. Генерируемая пушкой плазменная струя втекает в пробкотрон с дозвуковой скоростью по силовым линиям магнитного поля. В результате инъекции атомарных пучков в пробкотроне в объёме 3 литров образуется популяция горячих ионов (протонов) со средней энергией 6 кэВ плотностью до $1.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [3].

Одним из процессов, определяющих время жизни горячих ионов, является их перезарядка на присутствующих в плазме нейтралах. Было обнаружено, что при значительном ухудшении газовых условий вне плазменной струи существенно не изменялись время перезарядки и концентрация атомарного водорода в струе. В данной работе изучается это явление.

Материал статьи представлен следующим образом. Сначала приведены экспериментальные результаты. Затем предложена физическая модель явления, подкреплённая разумными оценками. Далее приведены результаты специально подготовленных и проведённых экспериментов. И в Заключение сформулированы основные результаты данной работы.

Экспериментальные результаты

Экспериментально было зарегистрировано, что концентрация атомарного водорода в плазменной струе не изменяется, в то время как плотность газа (водорода) снаружи значительно возрастает [4, 5].

Первое, что указывает на это, — временная зависимость интенсивности излучения линии H_{α} . Интенсивность излучения пропорциональна произведению плотностей атомов водорода и электронов и зависит от электронной температуры $I_{H\alpha} \sim n_a n_e f(T_e)$. На рис. 1 видно, что в течение продолжительного времени работы источника плазмы, когда температура и плотность электронов постоянны, интенсивность излучения линии H_{α} имеет плато, в то время как плотность газа, измеряемая вблизи плазмы импульсным монометрическим датчиком на основе магниторазрядной ячейки [6], возрастает с $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ до $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Из абсолютной калибровки детекторов излучения плотность нейтрального водорода в плазменной струе оценивается величиной $n_a \sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. О радиальной зависимости распределения n_a можно судить по результатам поперечных хордовых измерений. На рис. 2 приведены сигналы радиального распределения интенсивности излучения и линейной плотности плазмы, измеренной по ослаблению диагностического пучка быстрых атомов водорода. Профили имеют подобный характер, следовательно излучение идет не из пограничной оболочки плазма-газ, а из всего плазменного столба, что указывает на глубокое проникновение водорода в плазму.

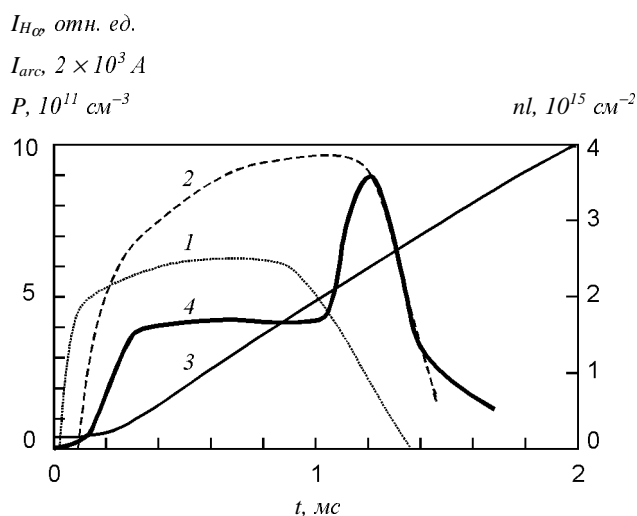


Рис. 1. Временные зависимости тока дуги плазменной пушки I_{arc} (1), линейной плотности плазмы nl (2), давления газа P (3) и интенсивности излучения на линии H_{α} (4).

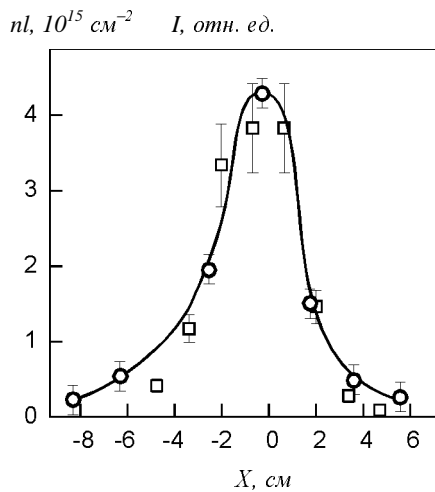


Рис. 2. Хордовые распределения интенсивности излучения линии H_α (○) и линейной плотности плазмы nl (□).

Вторым фактором, подтверждающим независимость концентрации атомарного водорода в струе от газовых условий вне струи, является постоянство времени перезарядки горячих ионов τ_{ex} в течение всей длительности разряда. Время τ_{ex} определяется из эволюции энергетического спектра горячих ионов. Конечно, время перезарядки определяется процессами со всеми присутствующими нейтралами в мишенной плазме, но перезарядка на атомарном водороде носит резонансный характер и является доминирующим процессом. Измеренный эффективный заряд плазмы также близок к единице. Эксперименты по определению τ_{ex} проводились на очень умеренных токах инжекции атомарных пучков, поэтому концентрация быстрых “пучковых” атомов водорода в плазменной струе была много меньше величины 10^9 см^{-3} и перезарядка на этих атомах была несущественной.

Формирование экранирующего потока быстрых атомов

Попытка объяснить эти факты приводит к появлению концепции о потоке быстрых атомов, окружающего плазменную струю и экранирующего последнюю от внешнего газа. Такая оболочка может формироваться в газо-плазменном облаке вблизи источника плазмы в результате перезарядки ионов плазменной струи с Франк-Кондоновскими атомами водорода, образованными в результате диссоциации молекул водорода. Схематично механизм формирования экранирующей оболочки из быстрых атомов показан на рис. 3.

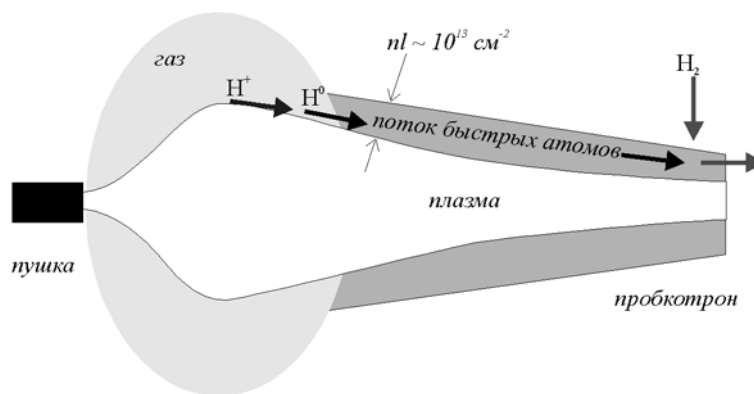


Рис. 3. Схема формирования потока быстрых атомов, экранирующих плазменную струю в пробкотроне от поступления холодного газа.

Источник плазмы начинает заполняться водородом за 2 мс до поджига разряда. Молекулы водорода вытекают из канала источника, и вблизи пушки формируется облако молекулярного водорода с характерным размером 0.5 м и плотностью порядка 10^{14} см^{-3} . В дальнейшем, при появлении плазменной струи, эти молекулы водорода попадают в плазменную струю и диссоциируются электронным ударом на периферии струи в достаточно тонком слое. Толщина этого слоя может быть оценена следующим образом. При энергии электронов 10 эВ сечение диссоциации молекулы водорода электроном имеет величину $2.5 \times 10^{-17} \text{ см}^2$ [8, С3.3]. Следовательно, молекула водорода диссоциирует за время $\tau_d \sim 1/(n_e \cdot \sigma_d \cdot v_e)$, проходя расстояние, равное $l = v_{H_2} / (n_e \cdot \sigma_d \cdot v_e)$. Подставив характерные значения скорости молекулы водорода при комнатной температуре $v_{H_2} = 1.5 \times 10^5 \text{ см/с}$, плотности плазмы $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и скорости электронов $v_e = 2 \times 10^8 \text{ см/с}$, получим толщину слоя диссоциации молекулы $l = 3 \text{ см}$.

В результате диссоциации молекул водорода образуются Франк-Кондоновские атомы с энергией порядка 2 эВ. Образовавшиеся в тонком слое Франк-Кондоновские атомы глубже проникают в плазменную струю. Вследствие увеличения скорости этих атомов по сравнению со скоростью молекул водорода плотность Франк-Кондоновских атомов уменьшается до величины $\sim 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Конечно, эта оценка верна, если не учитывать перезарядку. Но именно перезарядка Франк-Кондоновских атомов с ионами плазмы приводит к появлению потока быстрых атомов. Дело в том, что на выходе из источника в спадающем магнитном поле плазменный поток расширяется, и на периферии струи реализуется бесстолкновительное течение с ускорением протонов в продольном направлении. На расстоянии 40 см от источника силовые линии магнитного поля параллельны оси, а ионы на периферии имеют характерную продольную скорость, соответствующую энергии в $2.5-3 T_i$, и низкую

поперечную температуру. Сечение перезарядки протонов с энергией десятки электронвольт с атомами водорода имеет характерную величину $\sigma_{cx} = 4 \times 10^{-15} \text{ см}^2$ [8, А4.2]. Продольный размер, на котором протон перезаряжается в быстрый атом, летящий преимущественно вдоль оси установки, можно оценить как $L \sim (n \cdot \sigma_{cx})^{-1}$. При плотности 10^{13} см^{-3} получим $L \approx 25 \text{ см}$, что соответствует условиям эксперимента. Линейную плотность потока быстрых атомов nl оценим из предположения, что половина Франк-Кондоновских атомов глубже проникает в плазму и участвует в процессе перезарядки с быстрыми протонами, приводящему к образованию потока быстрых атомов. Тогда можно записать: $nl = 0,5 n_{FC} L v_{FC}/v \approx 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Полное число молекул водорода, которые участвуют в преобразовывании потока протонов в поток атомов, составляет величину 2×10^{18} молекул за импульс. Это вполне разумная величина — несколько процентов от полного количества напускаемых молекул.

Этот быстрый поток атомов с линейной плотностью около $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ сопровождает плазменную струю и защищает её от внешнего холодного газа. Примем за величину сечения упругого рассеяния быстрых атомов водорода на медленных молекулах водорода величину соответствующего сечения упругого рассеяния протонов энергией в области 10 эВ на молекулах водорода, приведенную в работе [7]: $\sigma_{se} v_H/v_{H_2} \approx 4.5 \times 10^{-14} \text{ см}^2$. Тогда необходимая для защиты линейная плотность быстрых атомов равна $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Именно такая линейная плотность плазмы быстрых атомов, как было показано выше, реализуется в данном эксперименте. Холодный газ в пробкотроне слабо влияет на распространение потока быстрых атомов, поскольку поперечный импульс потока холодного газа много меньше продольного импульса потока быстрых атомов.

В начальный момент работы пушки плазменная струя пролетает через облако газа. Из-за перезарядки ионов на газе также образуется поток быстрых атомов внутри струи, но вследствие достаточно большой плотности электронов эти атомы эффективно ионизируются электронным ударом и не влияют на газовые условия в струе в пробкотроне. Оценка ослабления плотности быстрых атомов в плазменной струе при прохождении расстояния до пробкотрона даёт большую величину:

$$\frac{\Delta n_a}{n_a} \sim n_e \frac{\langle \sigma v_e \rangle_i}{v_a} L = 3 \cdot 10^{14} \frac{10^{-8}}{4 \cdot 10^6} 150 \sim 10^2.$$

Образование быстрых атомов в результате рекомбинации протонов и электронов пренебрежимо мало. В нашем случае из-за достаточно высокой электронной температуры и относительно невысокой плотности плазмы основным процессом рекомбинации является фоторекомбинация. Коэффициент рекомбинации при $T_e = 8 \text{ эВ}$ имеет величину $\alpha \approx 5 \times 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [9]. Время движения плазменной струи от источника до пробкотрона имеет величину порядка $\tau_f \sim 100 \text{ мкс}$. Тогда пренебрегая изменением сечения струя можно оценить плотность атомов в пробкотроне, образовавшихся в результате рекомбинации, как $n \cdot \alpha \cdot \tau_f \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$.

После выключения источника плазмы заканчивается генерация потока быстрых атомов, и холодный газ, окружающий плазму, проникает в неё. Интенсивность излучения на линии H_{α} (см. Рис. 1) резко возрастает даже в процессе уменьшений плотности и температуры электронов. Также регистрируется уменьшение времени жизни по перезарядке горячих ионов.

Подтверждением существования экранирующей оболочки из быстрых атомов и предлагаемого механизма ее формирования могут служить результаты двух специально подготовленных и проведённых экспериментов.

Первый: при изменении длительности работы плазменного источника максимальная величина интенсивности излучения на линии H_{α} (после выключения) коррелировала с давлением газа в камере — чем раньше выключали источник, тем она меньше, чем позже, тем, соответственно, больше.

Второй: в транспортирующей области перед входом в пробку с одной стороны плазменной струи перпендикулярно оси вдвигали лимитер-диафрагму, которая должна отсекает поток сопутствующих быстрых атомов. И действительно, при введении диафрагмы плато в интенсивности излучения на линии H_{α} пропадало — интенсивность начинала расти линейно. Конечно, введение этой диафрагмы могло приводить к значительному потоку примесей, но качественно эксперимент подтверждает предлагаемое физическое объяснение.

Заключение

Обнаружено явление газовой самоизоляции плазменной струи и предложено физическое объяснение этого явления. Вблизи источника плазмы в газо-плазменном облаке в результате перезарядки ионов плазменной струи на Франк-Кондоновских атомах водорода, образованных в результате диссоциации молекул водорода, формируется направленный поток быстрых атомов с энергией ~ 50 эВ и полным током ~ 300 А. Этот поток атомов сопровождает плазменную струю и экранирует её от проникновения внешнего холодного газа.

Данное явление представляет как самостоятельный интерес, так и может быть использовано в различных приложениях УТС. Интенсивные потоки быстрых атомов находят широкое применение в плазменных технологиях, а на формирование мощных атомарных потоков направлены исследования по созданию плазменных двигателей для ближайших межпланетных перелетов.

Литература

1. Bender E. D., Chupriyanov V. E., Dimov G. I. et al. Proc. Int. School of Plasma Physics, Villa Monastero, Varenna, Italy, October 15-24, 1990, p. 157.
2. Димов Г. И., Кабанцев А. А., Таскаев С. Ю. Вопросы атомной науки и техники. Сер: Термоядерный синтез. **3** (1989) 58.
3. Кабанцев А. А., Соколов В. Г., Таскаев С. Ю. Физика плазмы **21** (1995) 775.
4. Gilev E. A., Dimov G. I., Kabantsev A. A., Sokolov V. G., Taskaev S. Yu. Proc. Int. Conf. on Open Plasma Confinement Systems for Fusion. Novosibirsk, Russia (1993) 485.
5. Кабанцев А. А., Соколов В. Г., Таскаев С. Ю., Чуприянов В. Е. VII Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы, Минск **3** (1991) 67.
6. Бендер Е. Д., Чуприянов В. Е. V Всесоюзное совещание по диагностике высокотемпературной плазмы, Минск (1990) 230.
7. Kerr R. J. Nucl. Fusion **3** (1963) 197.
8. Barnett C. F., Ray J. A., Ricci E. et al. Atomic data for controlled fusion research. Oak Ridge National Laboratory. ORNL-5206, 1977.
9. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. "Наука", М., 1992.