

УДК 533.95:537.84

## ДИНАМИКА ПОТЕНЦИАЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ПРОБКОТРОНЕ АТОМАРНЫМИ ПУЧКАМИ

© 1997 г. С. Ю. Таскаев

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН"

Поступила в редакцию 08.10.96 г.

Окончательный вариант получен 04.02.97 г.

В эксперименте по нагреву плазмы на пробкотроне АМБАЛ-Ю было обнаружено, что инжекция высокоэнергетичных атомарных пучков приводит к значительному уменьшению плотности мишенной плазмы. В предыдущей работе приведены экспериментальные результаты, предложена модель, проведено численное моделирование, показана адекватность модели явлению и дано объяснение. В данной работе рассматривается динамика потенциалов плазменной струи при ее нагреве в пробкотроне атомарными пучками. Это рассмотрение позволяет лучше понять наблюдаемое уменьшение плотности мишенной плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах на установке АМБАЛ-Ю [1] было экспериментально обнаружено неожиданное и интересное явление: инжекция пучков высокоэнергетичных атомов водорода в пробкотрон приводит к значительному уменьшению плотности мишенной плазмы.

АМБАЛ-Ю – это классический одиночный 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 ведется в пробкотрон перпендикулярно оси. Пробкотрон предварительно заполняется плазмой плотностью  $2.4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , характерной температурой электронов и ионов порядка 10 эВ с помощью "целевой" плазменной пушки [2], расположенной в пробочной области. Генерируемая пушкой плазменная струя втекает в пробкотрон по силовым линиям магнитного поля. Течение дозвуковое до выходной пробки пробкотрона и сверхзвуковое – после. В результате инжекции атомарных пучков в пробкотроне в объеме 3 л образуется популяция горячих ионов со средней энергией 6 кэВ, плотностью до  $1.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В это время плотность мишенной плазмы значительно уменьшается (до 2.5 раз).

В предыдущей работе [3] приведены экспериментальные результаты, рассмотрена временная задача течения плазменной струи в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики при наличии в пробкотроне популяции горячих ионов, описана схема численного счета и показано, что результаты численных расчетов находятся в хорошем согласии со всеми экспериментальными результатами. Было дано объяснение этому явлению [3, 4] на языке распределения давления.

В данной работе рассматривается динамика потенциалов плазменной струи при ее нагреве в пробкотроне атомарными пучками. Это рассмотрение позволяет лучше понять наблюдаемое уменьшение плотности мишенной плазмы. В работе используются результаты численных расчетов работы [3]. Поскольку численные расчеты хорошо согласуются со всеми экспериментальными результатами, то при объяснении явления для полноты и удобства приводятся только расчетные графики. Исходные экспериментальные данные о поведении, например, потенциала плазмы, электронной температуры и плотности плазмы можно найти в [3].

### ПОВЕДЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ВО ВРЕМЕНИ. ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены продольные распределения магнитного поля и плотности горячих ионов ( $z = 0$  соответствует центру пробкотрона, а пушка расположена в  $z = -170 \text{ см}$ ). Временная зависимость плотности горячих ионов задавалась так: линейный рост в течение первых 10 мкс, а затем постоянная величина, равная  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Энергия горячих ионов задавалась равной 5 кэВ.

Инжекция приводит к быстрому накоплению горячих ионов. Горячие ионы в результате кулоновских столкновений с электронами и ионами мишенной плазмы быстро теряют энергию. Так, начальное время торможения на еще плотной и холодной плазме составляет всего 3 мкс. Большую часть мощности горячие ионы передают электронам и совсем незначительную – непосредственно ионам мишенной плазмы. Электроны быстро нагреваются. На рис. 2а приведены продольные распределения температуры электронов в характерные моменты времени. Видно, что

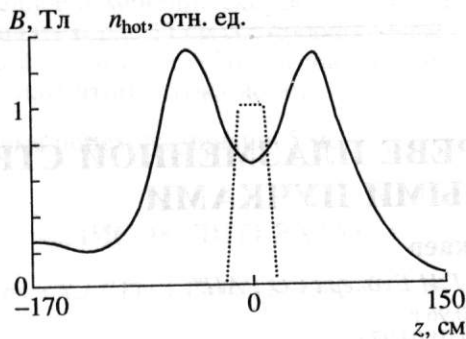


Рис. 1. Продольные распределения величины магнитного поля (сплошная кривая) и плотности горячих ионов (пунктир).

электронная температура в центре пробкотрона быстро (за 10 мкс) возрастает с 10 до 18 эВ.

Для удержания этих нагретых электронов потенциал плазмы в пробкотроне существенно возрастает. Возникает продольное электрическое поле, тормозящее натекающие ионы и ускоряющее вытекающие. Из-за торможения уменьшается поток плазмы через пробкотрон, и именно из-за этого, поскольку скорость не изменяется, начинает уменьшаться плотность плазмы. На рис. 2б приведены продольные распределения потока плазмы. Торможение перед областью инжекции приводит к уменьшению потока и накоплению плазмы, а ускорение за этой областью – к тому, что ускоренный поток догоняет ранее вытекший менее ускоренный, и там поток плазмы возрастает. Ко времени 100 мкс поток плазмы везде возвращается к начальному значению – назовем это стационарным состоянием. Поток плазмы через

пробкотрон становится таким же, как вначале. Наша задача – проследить за изменением плотности.

Сначала рассмотрим ситуацию, которая реализуется между пушкой и областью инжекции. Течение определяется ионами. Уравнение движения записывается как  $Mn \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p_i}{\partial z} - \frac{\partial \pi_{izz}}{\partial z} + enE_z + 0.71n \frac{\partial T_e}{\partial z}$ . Удобно описывать течение на языке потенциалов, поскольку для стационарного состояния изменение скорости связано с потенциалом простым соотношением  $\Delta \frac{Mu^2}{2} = -\Delta \phi$ . Потенциал в пушке примем за нуль.

Начнем с потенциала электрического поля  $\phi_E(z) = -e \int_{-170}^z E_z dz$  (рис. 3а). Как уже говорилось, для удержания быстро нагретых электронов потенциал в пробкотроне существенно возрастает. Возникает продольное электрическое поле, тормозящее натекающие ионы. Вследствие этого происходит накопление плазмы. Из-за высокой электронной теплопроводности в области перед пробкотроном нагреваются электроны, а от столкновений с ними и ионы. Распределение потенциала выхолаживается – в транспортирующей области плазма накапливается и нагревается, и для удержания электронов в пробкотроне требуется не такая глубокая яма. Но в стационарном состоянии потенциал электрического поля в пробкотроне становится все же выше, чем до инжекции, т.е. электрическое поле по-прежнему тормозит натекающие ионы. В стационарном со-

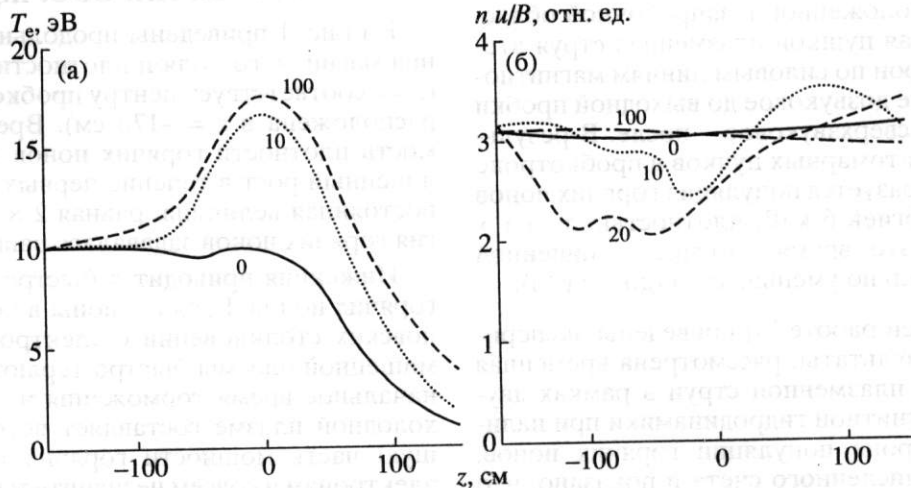


Рис. 2. Продольные распределения электронной температуры (а) и потока плазмы (б) в различные моменты времени. Цифры, как и на последующих рисунках, соответствуют моментам времени (в микросекундах) от начала появления популяции горячих ионов в пробкотроне.

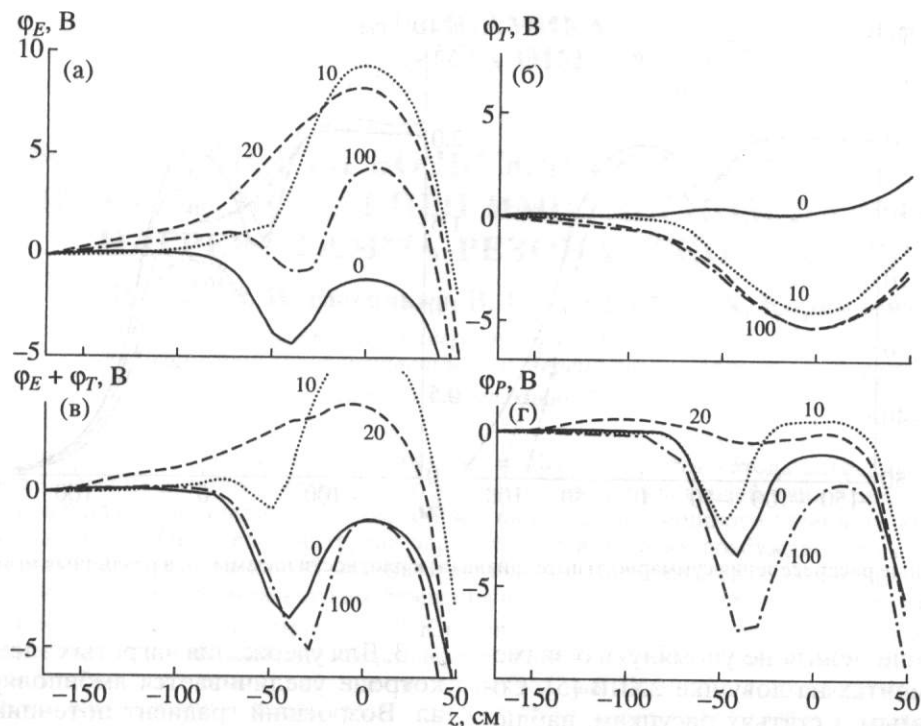


Рис. 3. Продольные распределения потенциала электрического поля (а), потенциала термосилы (б), суммы потенциалов электрического поля и термосилы (в) и потенциала ионного давления (г) в различные моменты времени.

стоянии поток плазмы возвращается к начальной величине. Тогда почему же падает плотность? Она, наоборот, должна была бы возрасти из-за торможения потока электрическим полем.

Учтем термосилу. Она связана с продольным градиентом электронной температуры. Потенциал термосилы записывается как  $\phi_T(z) = 0.71(T_e(-170) - T_e(z))$ . Распределение этого потенциала приведено на рис. 3б. Электроны, приходящие из области с более высокой температурой, действуют на ионы с меньшей силой, чем приходящие из области с меньшей температурой. Это связано с сильной зависимостью времени столкновений от скорости ( $\tau \sim v^{-3}$ ). Более быстрые электроны, хотя и передают больший импульс, но реже сталкиваются. Термосила ускоряет натекающие ионы.

На следующем графике (рис. 3в) приведена сумма потенциалов электрического поля и термосилы, видно их влияние на торможение в переходный период. Но суммы этих потенциалов в начальный и конечный момент времени в центре пробкотрона равны, поэтому их действие не приводит к изменению скорости и, следовательно, плотности.

Весь эффект — в изменении работы сил ионного давления, что наглядно демонстрирует приводимый график (рис. 3г) потенциала ионного давления, который определен следующим образом:

$$\phi_p(z) = \int_{-170}^z \frac{1}{n} \frac{\partial p_i}{\partial z} dz.$$
 Видно, что в конечный момент потенциал ниже, чем в начальный, следовательно, потоковая скорость увеличилась, а плотность упала.

Чтобы лучше разобраться с работой сил давления, проследим за вытекающими ионами. Перейдем к графику распределения суммарного потенциала — сумме потенциалов электрического поля, термосилы, ионного давления и для полноты картины — вязкости (рис. 4а). Рост потенциала плазмы, удерживающего электроны в пробкотроне, приводит к увеличению градиента потенциала на выходе. Электрическое поле (не только оно одно) сильнее ускоряет ионы и вытягивает их из пробкотрона. Ионы быстрее покидают пробкотрон. Вместе с тем, что поток через пробкотрон уменьшился, это приводит к сильному уменьшению плотности ионов в пробкотроне. К тому времени, когда поток плазмы возвращается к начальной величине, перепад потенциала между транспортирующей областью и пробкотроном становится больше, что связано именно с малой плотностью плазмы в пробкотроне. Втекающие в пробкотрон ионы ускоряются сильнее, их потоковая скорость становится больше и, следовательно, плотность меньше. Продольные распределения плотности плазмы приведены на рис. 4б.

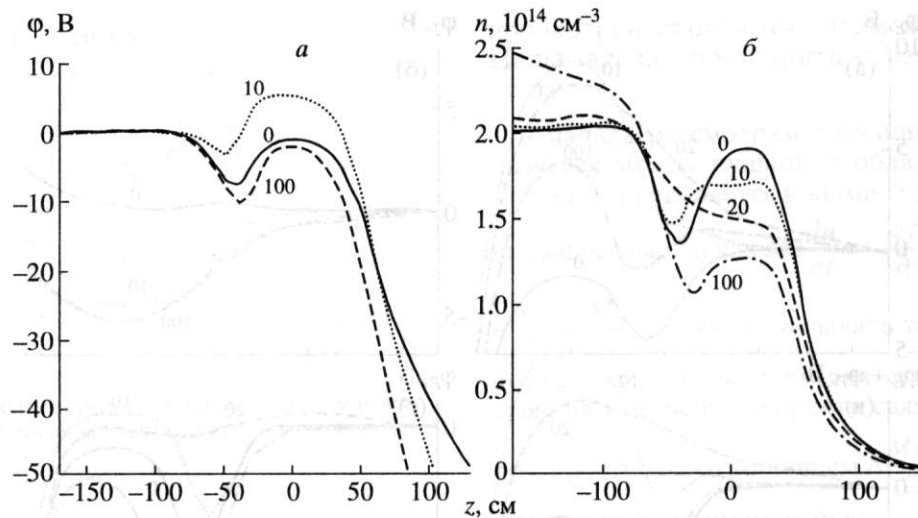


Рис. 4. Продольные распределения суммарного потенциала (а) и плотности плазмы (б) в различные моменты времени.

И в завершение нельзя не упомянуть о знаменитых экспериментах на ловушке 2ХИВ [5]. Согласно приводимым в статьях рисункам, наблюдалось уменьшение плотности мишенной плазмы при инъекции, но на этом не акцентировали внимания, вероятно, полагая, что уменьшение связано с очевидным механизмом замещения иона мишенной плазмы горячим ионом в результате перезарядки. Отметим, что плазменная струя имела высокую ионную температуру, так что в пробкотроне реализовалось бесстолкновительное течение (см., например, рис. 9 в [6]), при котором изученный нами эффект, характерный для столкновительной плазмы, не проявляется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена динамика потенциалов плазменной струи в результате ее нагрева в пробкотроне атомарными пучками. На основе этого рассмотрения предложено объяснение наблюдаемого уменьшения плотности мишенной плазмы при инъекции в пробкотрон атомарных пучков. Наблюдения и расчеты, касающиеся этого явления, теперь можно обобщить следующим образом (первые два пункта взяты из [3]):

1. Захваченные горячие ионы эффективно нагревают ионы мишенной плазмы, но не непосредственно, а через электроны.
2. Нагрев приводит к увеличению потоковой скорости плазменной струи и, соответственно, к уменьшению плотности плазмы.

3. Для удержания нагретых электронов в пробкотроне увеличивается амбиполярный потенциал. Возросший градиент потенциала приводит к более сильному ускорению вытекающих ионов. Электрическое поле вытягивает ионы из пробкотрона. В начальный момент накопления увеличение того же амбиполярного потенциала приводит к торможению натекающих ионов, уменьшению потока и уменьшению плотности.

4. В данных процессах оказался важным вклад продольной электронной термосилы.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность Г.И. Димову за инициализацию данного подхода к объяснению явления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bender E.D., Chupriyanov V.E., Dimov G.I. et al.* // Proc. Int. School of Plasma Phys. Varenna, Como, Italy, October 15–24, 1990. P. 157.
2. *Димов Г.И., Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термояд. синтез. М.: ИАЭ, 1989. Т. 3. С. 58.
3. *Кабанцев А.А., Соколов В.Г., Таскаев С.Ю.* // Физика плазмы. 1995. Т. 21. С. 775.
4. *Taskaev S.Yu.* // XXII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Hoboken, USA, July 31–August 4, 1995. Contr. Papers. V. 3. P. 83.
5. *Coensgen F.H., Clauser J.F., Correll D.L. et al.* // Proc. Sixth Int. Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res. (Berchtesgaden, 1976). Nucl. Fusion Suppl. 1977. V. 3. P. 135.
6. *Rognlien T.D., Brengle T.A.* // Phys. Fluids. 1981. V. 24. P. 871.