

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

**Таскаев С.Ю.**

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

*В эксперименте по нагреву плазмы на пробкотроне АМБАЛ-Ю было обнаружено интересное явление — инжекция высокоэнергетичных атомарных пучков приводит к значительному уменьшению плотности мишенной плазмы. В предыдущей работе [3] приведены экспериментальные результаты, предложена модель, проведено численное моделирование, показана адекватность модели явлению и дано объяснение. В данной работе рассматривается динамика потенциалов плазменной струи при её нагреве в пробкотроне атомарными пучками. Это рассмотрение позволяет лучше понять и представить наблюдаемое уменьшение плотности мишенной плазмы и содержит ряд интересных моментов.*

## **DYNAMICS OF POTENTIALS DURING NEUTRAL-BEAM HEATING OF PLASMA STREAM IN A TANDEM MIRROR**

**S. Yu. Taskaev**

*In previous experiments on plasma heating by neutral beam injection at the AMBAL-Yu device, a decreasing of target plasma density was observed. Experimental results are given in [3]. Also, there is a model proposed there, a numerical modeling is carried out, an adequacy between the model and the phenomenon is shown, and an explanation of the phenomenon is given there. In this paper the dynamics of potentials during neutral beam heating of plasma stream in tandem mirror is considered. This consideration makes possible better understanding of the phenomenon, and it contains a number of interesting moments.*

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

Установка 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 ведётся в пробкотрон перпендикулярно оси. Пробкотрон предварительно заполняется плазмой плотностью  $2,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , характерной температурой электронов и ионов порядка 10 эВ с помощью щелевой плазменной пушки [2], расположенной в запробочной области. Генерируемая пушкой плазменная струя втекает в пробкотрон по силовым линиям магнитного поля. Течение — дозвуковое до выходной пробки пробкотрона и сверхзвуковое после. Электрический ток на пластины торцевых плазмоприёмников практически равен нулю. В результате инжекции атомарных пучков в пробкотроне в объёме 3 литров образуется популяция горячих ионов со средней энергией 6 кэВ плотностью до  $1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Температура электронов в пробкотроне возрастает с 8 эВ до 25 эВ. В это время плотность мишенной плазмы значительно уменьшается (до 2,5 раз).

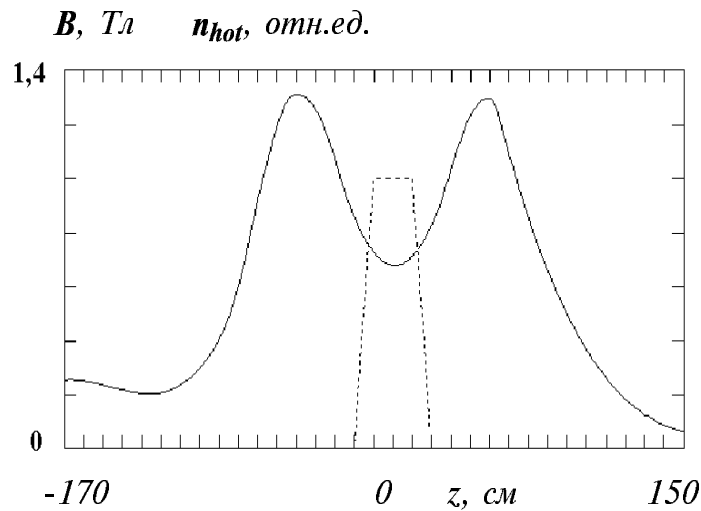
В предыдущей работе [3] приведены экспериментальные результаты, рассмотрена временная задача течения плазменной струи в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики при наличии в пробкотроне

популяции горячих ионов, описана разностная схема численного счёта и показано, что результаты численных расчётов находятся в хорошем согласии со всеми экспериментальными результатами. Было дано объяснение этому явлению [3,4]. При объяснении, в основном, использовалось понятие давления.

В данной работе рассматривается динамика потенциалов плазменной струи при её нагреве в пробкотроне атомарными пучками. Это рассмотрение позволяет лучше понять и представить наблюдаемое уменьшение плотности мишенной плазмы и содержит ряд интересных моментов. В работе используются результаты численных расчётов работы [3]. Поскольку, как отмечено выше, численные расчёты хорошо согласуются со всеми экспериментальными результатами, то при объяснении явления, для полноты и удобства, приводятся только расчётные графики. Экспериментальные данные о поведении, например, потенциала плазмы, электронной температуры и плотности плазмы можно найти в работе [3].

## Обсуждение

На Рис. 1 приведены используемые в расчётах продольные распределения магнитного поля и плотности горячих ионов ( $z = 0$  соответствует центру пробкотрона, а пушка расположена в  $z = -170$  см). Временная зависимость плотности горячих ионов задавалась как линейный рост в течение первых  $10$  мкс, а затем постоянная величина, равная  $2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Энергия горячих ионов задавалась равной  $\mathcal{E}_{hot} = 5$  кэВ.



*Рис. 1. Продольные распределения величины магнитного поля ( — ) и плотности горячих ионов ( ····· ).*

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 ещё плотной и холодной плазме всего 3 мкс. Большую часть мощности горячие ионы передают электронам, и совсем незначительную — непосредственно ионам мишенной плазмы. Электроны быстро нагреваются. На Рис. 2, а приведены продольные распределения температуры электронов в различные характерные моменты времени. Видно, что электронная температура в центре пробкотрона быстро (за 10 мкс) возрастает с 10 эВ 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

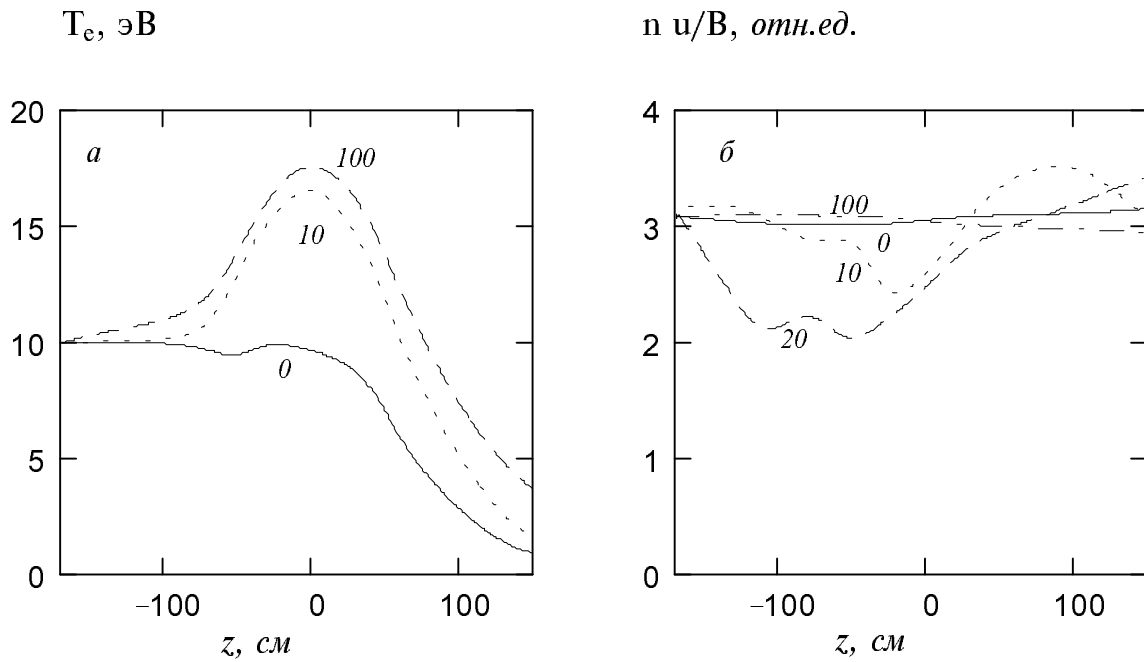


Рис. 2. Продольные распределения электронной температуры (а) и потока плазмы (б) в различные моменты времени<sup>1</sup>.

плазмы. На Рис. 2, б 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 — это назовём стационарным состоянием. Поток плазмы через пробкотрон стал таким же, тогда непонятно почему упала плотность?

Сначала рассмотрим ситуацию, которая реализуется между пушкой и областью инъекции. Уравнение движения было записано как

$$Mn \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p_i}{\partial z} - \frac{\partial \pi_{i \ z \ z}}{\partial z} + en E_z + 0,71n \frac{\partial T_e}{\partial z}. \quad \text{Течение определяется}$$

ионами, и понаблюдаем за поведением потенциалов. Применение этого рассмотрения удобно, поскольку для стационарного состояния изменение скорости связано с потенциалом достаточно простым соотношением

$$\Delta \frac{Mu^2}{2} = -\Delta\phi. \quad \text{Для удобства будем приводить распределения потенциалов}$$

не абсолютные, а относительные, когда за  $0$  будет браться потенциал в пушке.

Начнём с потенциала электрического поля

$$\phi_E(z) = -e \int_{-170}^z E_z dz \quad (\text{Рис. 3, а}). \quad \text{Как уже говорилось, для удержания}$$

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 выполаживается — 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 всё же выше, чем до инъекции, т.е. электрическое поле по-прежнему тормозит натекающие ионы. В стационарном состоянии поток плазмы возвратился к начальной

величине. Тогда почему упала плотность? Она наоборот должна была возрасти из-за торможения потока электрическим полем.

Учтём термосилу. Она связана с продольным градиентом электронной температуры. Потенциал термосилы записывается как  $\varphi_T(z) = 0,71 (T_e(-170) - T_e(z))$ . Распределение потенциала приведено

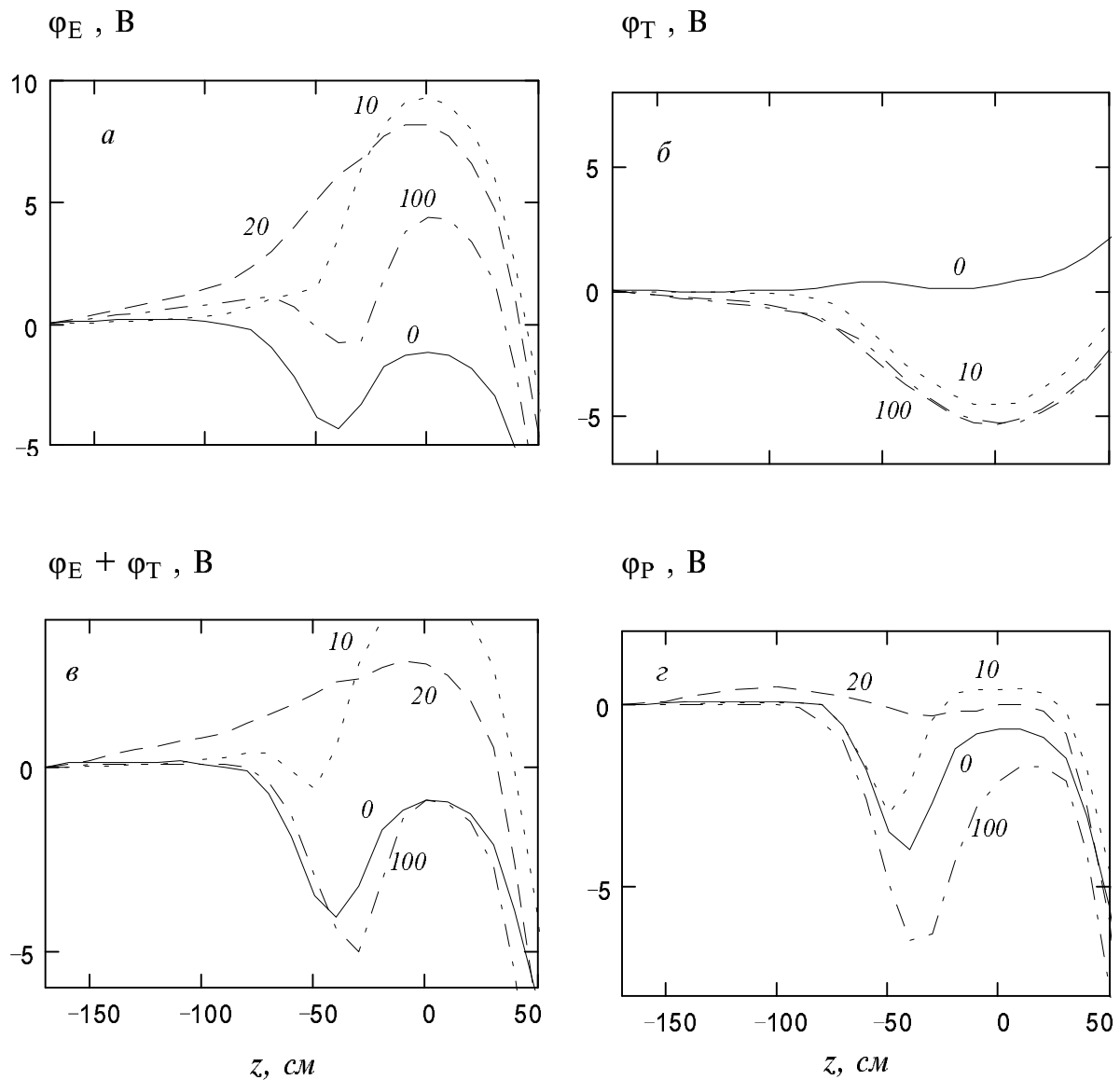


Рис. 3. Продольные распределения потенциала электрического поля (а), потенциала термосилы (б), суммы потенциалов электрического поля и термосилы (в) и потенциала ионного давления (г) в различные моменты времени.

на Рис. 3, б. Электроны, приходящие из области с более высокой температурой, оказывают на ионы меньшую силу, чем приходящие из области с меньшей температурой. Это связано с сильной зависимостью времени столкновений от скорости ( $\tau \sim v^3$ ). Более быстрые электроны хотя передают бóльший импульс, но значительно реже сталкиваются. Термосила ускоряет натекающие ионы.

На следующем графике (Рис. 3, в) приведена сумма потенциалов электрического поля и термосилы. Видно влияние на торможение в переходный период, но потенциалы в начальный и конечный момент времени в центре пробкотрона равны, и это не приводит к изменению скорости и, следовательно, плотности.

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

$$\varphi_p(z) = \int_{-170}^z \frac{1}{n} \frac{\partial p_i}{\partial z} dz .$$

Видно, что в конечный момент потенциал ниже,

чем в начальный, т.е. прирост скорости стал больше — потоковая скорость увеличилась — плотность упала.

Чтобы лучше разобраться с работой сил давления, проследим за вытекающими ионами. Перейдём к графику распределения суммарного потенциала — сумме потенциалов электрического поля, термосилы, ионного давления и, для полноты картины, вязкости (Рис. 4, а). Рост потенциала плазмы, удерживающего электроны в пробкотроне, приводит к увеличению градиента потенциала на выходе. Электрическое поле (вообще говоря, не



только оно одно) сильнее ускоряет ионы и вытягивает ионы 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. 4, б.

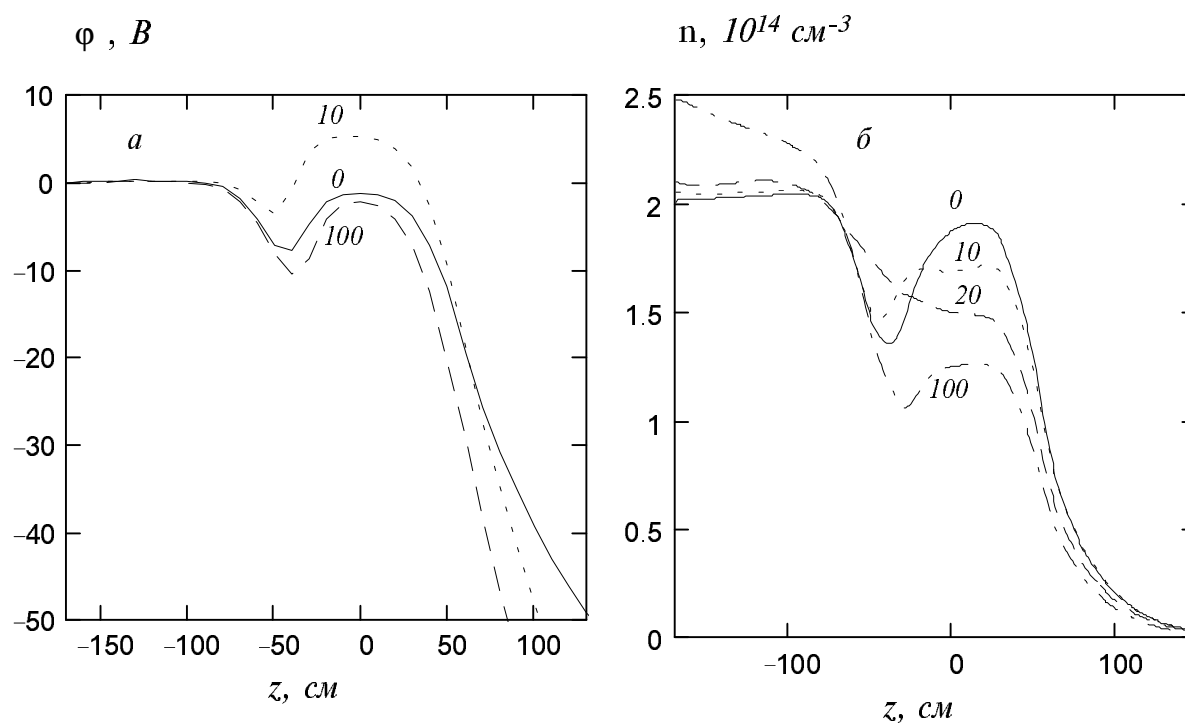


Рис. 4. Продольные распределения суммарного потенциала (а) и плотности плазмы (б) в различные моменты времени.

## Заключение

В работе рассмотрена динамика потенциалов плазменной струи в результате её нагрева в пробкотроне атомарными пучками. На основе этого рассмотрения предложено объяснение наблюдаемого уменьшения плотности мишенной плазмы при инжекции в пробкотрон атомарных пучков. Наблюдения и расчёты относительно этого явления теперь можно обобщить следующим образом (первые два пункта взяты из работы [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 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. 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.