

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Численное моделирование течения газообразного водорода в инжекторе пучка быстрых атомов выполнялось методом пробных частиц. В зависимости от конструкции инжекторного тракта и крионасосов рассчитаны потоки газа на криогенные насосы и выходящий из инжектора сопутствующий поток. Определен профиль плотности газа и время установления равновесной плотности в объеме инжектора. Расчеты показали, что вытекающего из ионного источника в нейтрализатор водорода достаточно для перезарядки сформированного ионного пучка. Облирка перезаряженного пучка атомов в инжекторном баке не превышает 1%.

А.С. Кривенко, В.И. Давыденко, А.А. Иванов,
А.Н. Драничников

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО
ПРОФИЛЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА
В ИНЖЕКТОРЕ АТОМОВ ВОДОРОДА
МЕТОДОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ**

**Modeling of neutral gas transient profile
in a hydrogen atom injector by stochastic dynamics method**

A.S. Krivenko, V.I. Davydenko, A.A. Ivanov, A.N. Dranichnikov
Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia
krivenko@inp.nsk.su

Computer simulation of gaseous hydrogen flow in a fast atom beam injector was performed by the test particle method. Gas flux on cryogenic pumps and accompanying flux outgoing from the injector were calculated depending on design of the injector tract. Profile of gas density and time of steady-state density establishment in the injector volume were determined. Computation has shown that gas leaking from the ion source to the neutralizer is enough for charge-exchange of a formed ion beam. Stripping of a neutralized beam in the injector chamber does not exceed 1%.

ИЯФ 2000-70

Новосибирск
2000

под углом Θ к нормали поверхности эмиссии считалась пропорциональной $\cos(\Theta)$ [2]. Направление вылета каждой частицы задавалось датчиком случайных чисел. После вылета пробные частицы без столкновений с другими частицами двигались до попадания на стенку. В случае отражающей поверхности из точки попадания частицы на нее генерировалась новая траектория. Направление вылета отраженной частицы задавалось датчиком случайных чисел, а вероятность вылета по прежнему была принята пропорциональной косинусу угла к нормали поверхности [2,3]. Количество частиц в расчетах каждого этапа составляло 2000.

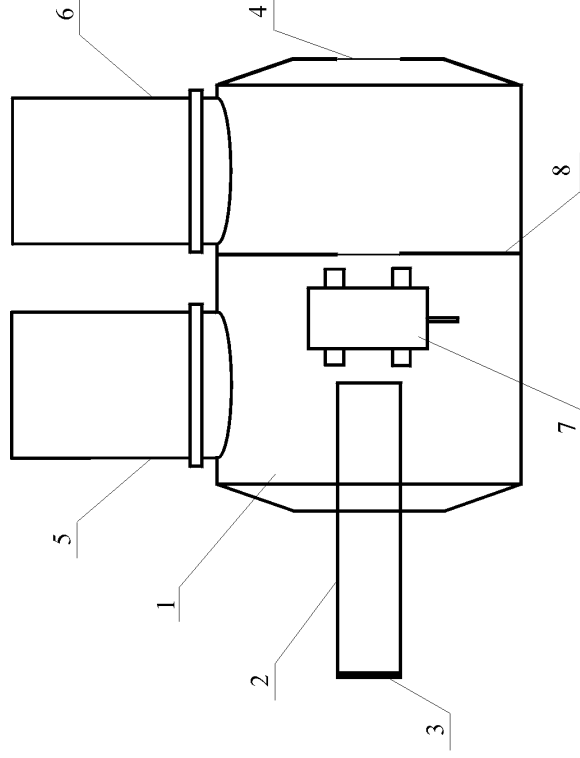


Рис. 1. Схема инжектора. 1 – нейтрализатор, 2 – инжекторный бак, 3 – ионно-оптическая система источника, 4 – выходное отверстие инжектора, 5, 6 – крионасосы, 7 – отклоняющий магнит, 8 – диафрагма.

Для упрощения расчетов все частицы эмиттировались в объем и попадали на стенки за один шаг, в каждом следующем шаге частицы слетали с отражающих поверхностей и снова попадали на стенки. Расчет прекращался при полном поглощении частиц поглощающими поверхностями. Длительность шага определялась временем пролета частицей поверхности. Длительность шага предполагалось, что скорость молекул водорода $1.6 \cdot 10^3$ м/с, а из источника пучка выходит сопутствующий поток $3 \text{ л} \cdot \text{торр/с}$ [4].

В работе представлены результаты численного моделирования течения газообразного водорода в инжекторе пучка быстрых водородных атомов. Моделирование выполнялось методом пробных частиц [1]. В зависимости от конструкции инжекторного тракта и крионасосов рассчитаны потоки газа на криогенные насосы и выходящий из инжектора сопутствующий поток. Кроме этого, определен профиль плотности газа в тракте пучка и время установления равновесной плотности в объеме инжектора.

Расчет производился для диагностического инжектора пучка быстрых атомов водорода, схема которого представлена на рис. 1. Вакуумный объем инжектора представляет собой цилиндрический бак диаметром 0.9 м и длиной 1.5 м. К одному из торцевых фланцев пристыковывается ионный источник. Выходящий из источника газообразный водород попадает в трубу нейтрализатора длиной 90 см и диаметром 18 см. Входящий из нейтрализатора газ откачивается установленным на боковом фланце крионасосом. Для снижения давления на выходе инжектора предусмотрен второй крионасос, установленный в выходной области, отделенный от остального объема диафрагмой с отверстием для пучка.

Вследствии наличия двух пространственных масштабов (нейтрализатор и инжекторный бак сильно отличаются по размерам) расчет производился в два этапа. На первом этапе пробные частицы эмиттировались из области ионно-оптической системы ионного источника и изучалось их движение в нейтрализаторе. На втором этапе пробные частицы эмиттировались в бак из выходного отверстия нейтрализатора и затем поглощались этим отверстием, выходным отверстием бака и двумя криогенными насосами. Предполагалось, что другие поверхности инжекторного тракта отражающие. Пробные частицы распределялись равномерно по поверхности эмиссии, вероятность их вылета

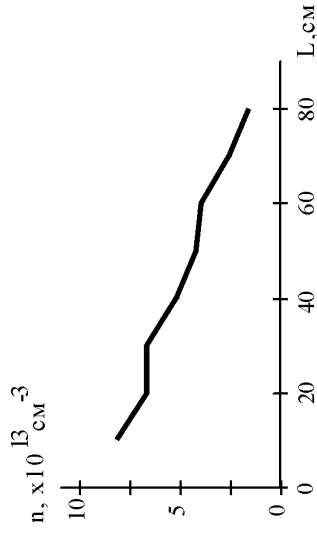


Рис. 2. Распределение плотности в трубе 90 см.

Для получения продольного профиля плотности на ось нейтронизатора вводились 8 кубических пробных объемов с размером грани 1 см, отражающих пробные частицы. Плотность газа определялась по числу столкновений частиц с пробным объемом. Расчитанное продольное распределение плотности показано на рис. 2. Толщина перезарядной мишени в объеме нейтронизатора оказалась равна $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Динамика прохождения газа через инжекторный тракт с нейтронизатором в начале инъекции проиллюстрирована на рис. 3, где показана зависимость выхода частиц из труб различной длины от времени. Принималось, что входное отверстие полностью поглощает газ.

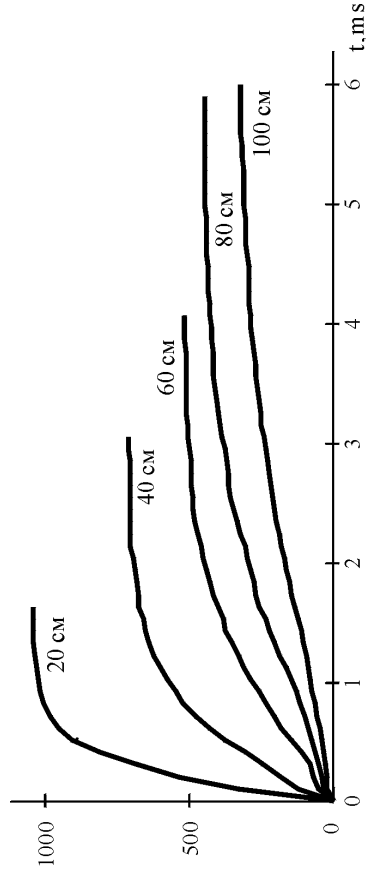


Рис. 3. Выход частиц из труб разной длины от времени.

Другой важной характеристикой течения газа в трубе является поток частиц в выходное отверстие трубы после эмиссии 2000 частиц. Зависимость от времени, представленная на рис. 4, имеет два максимума. Первый максимум связан с выходом пролетных частиц. Другой максимум соответствует времени около 1.5 мс, при этом через выходное отверстие выходит основная доля частиц газа.

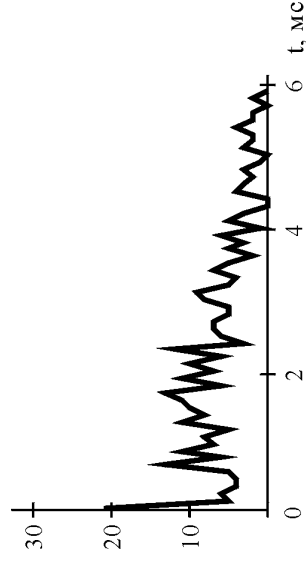


Рис. 4. Зависимость потока газа, выходящего после однократной эмиссии из трубы 80 см, от времени.

Таблица 1. Потоки газа, выходящие из бака при стационарном течении

	1 насос	2 насос	выходное отверстие	входное отверстие	на гранях вышло
I	1341	164	38	331	124
$\eta_1 = \eta_2 = 0.25$ $\xi_1 = \xi_2 = 0.75$	868	169	102	558	300
$\eta_1 = \eta_2 = 0.5$ $\xi_1 = \xi_2 = 0.5$	1073	163	69	491	201
$\eta_1 = \eta_2 = 0.75$ $\xi_1 = \xi_2 = 0.25$	1164	150	64	417	154
$\eta_1 = 1$ $\xi_1 = 0$ $\eta_2 = 0.25$ $\xi_2 = 0.75$	1313	104	66	369	145
$\eta_1 = 1$ $\xi_1 = 0$ $\eta_2 = 0.5$ $\xi_2 = 0.5$	1327	134	52	364	119
$\eta_1 = 1$ $\xi_1 = 0$ $\eta_2 = 0.75$ $\xi_2 = 0.25$	1336	154	43	342	122
II	1508	143	29	200	119
III	1354	113	32	363	134
IV	1375	111	34	224	131

Рассмотрим течение газа в баке инжектора. В таблице 1 показано число пробных частиц, выходящих из бака за один шаг расчета при стационарном течении. При каждом шаге в бак из выходного отверстия нейтронизатора эмиттировалось 2000 пробных частиц. Для определения реального потока газа

следует количество пробных частиц, выходящих в отверстие за один шаг расчета умножить на $5 \cdot 10^{16}$ сек⁻¹. Символы η_1 , ξ_1 и η_2 , ξ_2 обозначают степени поглощения и отражения газа первым и вторым насосом соответственно.

Входным отверстием бака является выход нейтронизатора. Последний столбец таблицы показывает количество вышедших из расчета частиц, что связано с несовершенством программы. Число вышедших на гранях поверхностей частиц растет с увеличением времени нахождения частиц в камере.

В основном варианте расчета (I) предполагалось, что бак разделен диафрагмой с отверстием для пучка диаметром 13 см, насосы полностью поглощают попавший на них газ. Далее в таблице приведены варианты с разной степенью поглощения газа насосами, что соответствует различным конструкциям жалюзи крионасоса.

Последние три строки таблицы соответствуют полностью поглощающим насосам. При укороченном на 20 см нейтронизаторе (II) возрастает поток газа на первый насос и снижается поток в выходное отверстие. Установка в отверстие диафрагмы трубы диаметром 13 см и длиной 15 см (III) также снижает выход частиц из бака. К снижению выхода частиц из бака приводит и использование вместо одной трех диафрагм, расположенных вдоль оси бака с расстоянием между ними 5 см (IV). Следует заметить, что эти способы приводят к относительно небольшому снижению выхода частиц из бака.

Распределение плотности газа в баке вдоль оси пучка, полученное использованием 9 пробных объемов, показано на рис. 5.

В рассмотренной геометрии инжектора толщина газа в баке вдоль пучка при стационарном течении составит $n_1 = 2 \cdot 10^{14}$ см⁻², что соответствует обдирке полученного пучка атомов после поворотного магнита менее 1%.

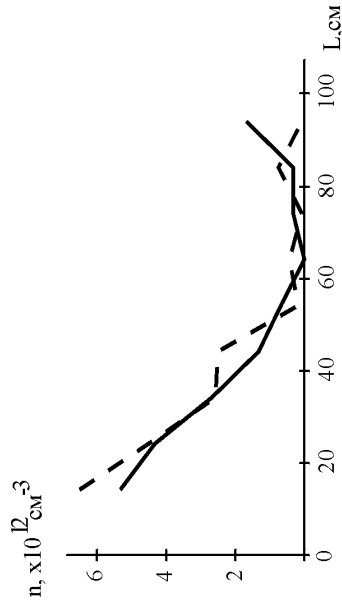


Рис. 5 Распределение плотности в баке вдоль пучка.

Расчетная зависимость выходящего из бака потока газа от времени показана на рис. 6. В расчете предполагалось, что насосы полностью поглощают попавший на них газ. Как видно, основная часть газа в баке откачивается насосами. Кроме того, из рисунка видно, что потоки на насосы растут медленно, за время порядка 60 мс. Рис. 6 а показывает, что во входное отверстие газ возвращается с близлежащих поверхностей внутри бака, поскольку заметный рост потока продолжается только около 4 мс. В выходное отверстие около половины выходящего потока попадает в начале импульса.

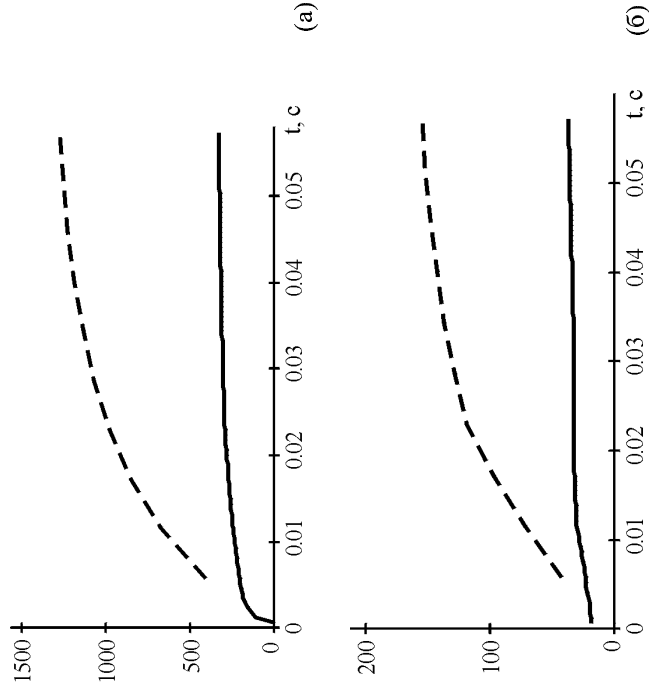


Рис. 6. Выходящий из бака поток в зависимости от времени. Пунктиром показаны потоки на первый – (а) и второй – (б) насосы, сплошными линиями во входное – (а), и в выходное – (б) отверстия.

Также были выполнены расчеты с однократно эмиттированной порцией газа. На рис. 7 приведены соответствующие потоки во входное и выходное отверстия бака инжектора. Предполагалось, что насосы полностью поглощают попавший на них газ. Как уже отмечалось, большая часть газа выходит в течение нескольких первых миллисекунд. Дальнейшие потоки существенно меньше, для удобства они показаны на рисунке в десятикратном увеличении.

Для расчета самосогласованного профиля газа в нейтрализаторе и инжекторном баке входящий в бак поток нормировался к выходящему из нейтрализатора с помощью следующего соотношения:

$$B_i = g_0 \frac{t_{i,5}}{2000} + \sum_{m=0}^{i-1} \frac{t_{m,5}}{2000} (g_{i-m} - g_{i-m-1}),$$

где t_i – поток, выходящий из газового нейтрализатора в i -й момент времени, индекс умножен на 5, с учетом большей длительности шага расчета инжекторного бака; g_i – поток в выходное отверстие бака в i -й момент времени, при постоянном натекании газа. Результат расчета показан на рис. 8. Как и следовало ожидать, заметный рост продолжается время порядка 7 мс, что согласуется с временем установления стационарного течения газа через нейтрализатор.

Отметим, что приведенные выше зависимости газовых потоков от времени оценочны, так как температура газа считалась комнатной, но газ в объеме инжектора может иметь повышенную температуру. Другим источником неточности может быть отличие углового распределения попадающих в инжекторный бак частиц от косинусоидального. Однако, по видимому, в молекулярном режиме течения больше частиц попадает в бак под большими углами к оси пучка. Такие частицы откачиваются насосами. Следовательно можно ожидать, что расчет дает завышенное значение выходящего из инжекторного тракта потока газа.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что вытекающего из ионного источника в нейтрализатор водорода достаточно для перезарядки сформированного ионного пучка. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными [4]. При потоке сопутствующего водорода 3 л · торр/с обдирка перезаряженного пучка атомов в инжекторном баке не превышает 1%. Время выхода течения газа на стационарный режим в нейтрализаторе составляет 6 мс. Основная откачка инжекторного бака осуществляется первым крионасосом. Время роста потоков на насосы составляет ~60 мс. Рассмотрено влияние возможных изменений конструкции инжекторного тракта (установка дополнительных диафрагм и т.д.) на величину выходящего из инжектора потока газа.

Данная работа поддержана грантом МНТЦ № 492-98.

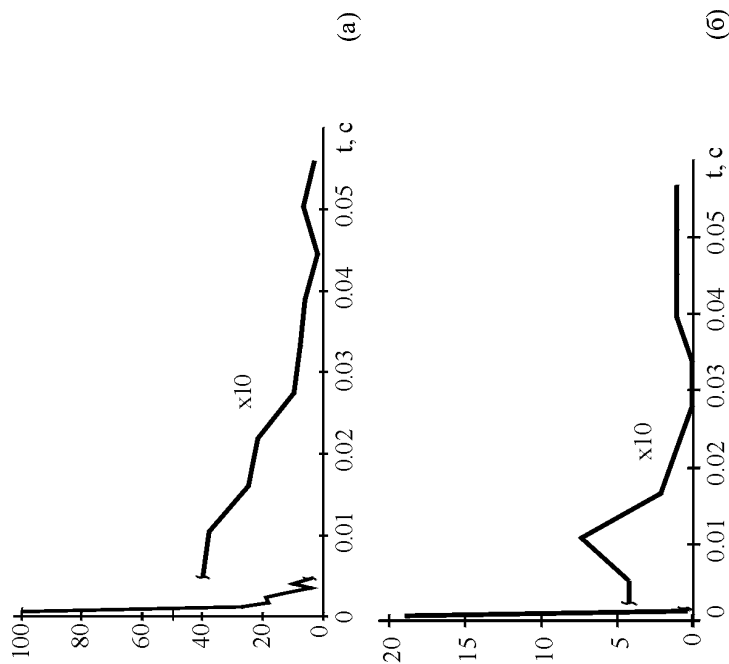


Рис. 7. Зависимость от времени потока попадающего на входное – (а) и выходное отверстие бака – (б), после однократной эмиссии порции газа.

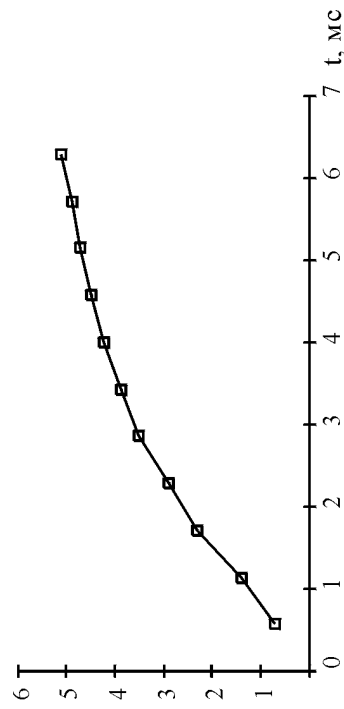


Рис. 8. Выход частиц из бака первые 7 мс, с учетом времени прохождения газа через нейтрализатор.

Литература

1. Д.В. Хеерман. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике, сер. Компьютеры в физике, М., Наука, 1990.
2. Г.Л. Саксаганский. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах, Атомиздат, 1980.
3. Л.Н. Розанов. Вакуумная Техника, М., Высшая школа, 1990.
4. А.А. Иванов, V.I. Davydenko, P.P. Deichuli, et. al. to be published in Rev. Sci. Instruments (2000).

А.С. Кривенко, В.И. Давыденко, А.А. Иванов, А.Н. Драничников

Моделирование нестационарного профиля нейтрального газа в инжекторе атомов водорода методом стохастической динамики

A.S. Krivenko, V.I. Davydenko, A.A. Ivanov, A.N. Dranitschnikov

Modeling of neutral gas transient profile in a hydrogen atom injector by stochastic dynamics method

ИЯФ 2000-70

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 9.08.2000 г.

Сдано в набор 20.09.2000 г.

Подписано в печать 21.09.2000 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №70

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротационной ГИИ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск., 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11.