

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Д.К. Топорков, С.А. Зеваков, Б.А. Лазаренко,  
Д.М. Николенко, В.А. Полухин, Р.Ш. Садыков,  
Ю.В. Шестаков, Р. Лу, Ф. Руан, С. Цай,  
В. Цен, С. Цо, Д. Юй

ВНУТРЕННЯЯ  
ГАЗОВАЯ КЛАСТЕРНАЯ МИШЕНЬ  
ДЛЯ НАКОПИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
г. ЛАНЬЧЖОУ  
(*Heavy Ion Research Facility Lanzhou –  
Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR*)

ИЯФ 2006-45

Новосибирск  
2006

**Внутренняя газовая кластерная мишень  
для накопителя тяжелых ионов г. Ланьчжоу  
(Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR)**

*Д.К. Топорков, С.А. Зеваков, Б.А. Лазаренко, Д.М. Николенко,  
В.А. Полухин, Р.Ш. Садыков, Ю.В. Шестаков*  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, СО РАН, Россия

*Р. Лу, Ф. Руан, С. Цай, В. Цен, С. Цо, Д. Юй*  
Институт современной физики, 730000, Ланьчжоу, АНК, КНР

**Аннотация**

Приводится описание внутренней газовой кластерной мишени для накопителя тяжелых ионов г. Ланьчжоу (Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR). Мишень должна обеспечивать плотную струю различных газов – H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, инертных и других газов. Приведены результаты измерений интенсивностей струй из водорода и аргона в зависимости от температуры сопла и расхода газа. Плотность газа в струе аргона и водорода порядка  $1.0 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> и  $1.75 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> соответственно. Давление окружающего газа в камере накопителя при прохождении через нее струи менее  $1.5 \cdot 10^{-11}$  мбар.

**Internal gas cluster target  
for Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR**

*D.K. Toporkov, S.A. Zevakov, B.A. Lazarenko, D.M. Nikolenko,  
V.A. Polukhin, R.Sh. Sadykov, Yu.V. Shestakov*

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, SB RAS, Russia

*Rongchun Lu, Fangfang Ruan, Xiaohong Cai, Wenlong Zhan, Caojie Shao and Deyang Yu*  
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, PR China

**Abstract**

A description of internal gas cluster target for Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR is given. The cluster target can provide the intense jet of different gases – hydrogen, nitrogen, inert and other gases. The results of the jet intensity measurements for hydrogen and argon gases versus the gas flow through the nozzle and nozzle temperature are presented. The densities of the gas in the jet of argon and hydrogen at the interaction point were found to be  $1.0 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> and  $1.75 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> respectively. The background pressure in the vacuum chamber of the ion ring was measured at the level less than  $1.5 \cdot 10^{-11}$  mbar under the jet operation.

---

## Введение

Проект HIRFL-CSR [1], с электронным охлаждением циркулирующего ионного пучка, является модернизацией исследовательской установки с тяжелыми ионами в Ланьчжоу. Новая установка дополнительно включает основное накопительное кольцо CSRm и экспериментальное кольцо CSRe. Тяжелые ионы из HIRFL будут накапливаться, охлаждаться и ускоряться до энергии 1100 МэВ/нуклон ( $^{12}\text{C}^{6+}$ ) в основном кольце, затем выводиться на мишени для получения радиоактивных ионных пучков или пучков многозарядных ионов. Пучки этих ионов могут быть использованы в экспериментальном кольце для постановки экспериментов с внутренней мишенью или высокоточной масс спектроскопии. Экспериментальное кольцо рассчитано на удержание многозарядных ионов с энергией до 750 МэВ/нуклон ( $^{12}\text{C}^{6+}$ ). В настоящее время основные установки комплекса HIRFL-CSR собраны, проверены и находятся в стадии сдачи в эксплуатацию [2].

Применение внутренней мишени в накопителе заряженных частиц открывает дополнительные экспериментальные возможности по сравнению с экспериментами на выведенном из ускорителя пучке. Это

1. Высокое энергетическое и угловое разрешение.
2. Практически непрерывный режим работы.
3. Проведение экспериментов с высокой точностью с сохранением большой скорости счета.
4. Возможность регистрации вторичных частиц без нарушения мишенью их параметров.
5. Возможность использования в накопителе уникальных первичных пучков радиоактивных тяжелых ионов.
6. Возможность использования в накопителе уникальных, например, поляризованных мишеней.

Кластерные газовые мишени использовались во многих лабораториях. Так на электронном накопителе ВЭПП-2 были применены мишени плотностью более  $1 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> из газов, давление паров которых при температуре жидкого азота мало (пары воды, аммиак и др.) [3]. Давление газов в камере накопителя было порядка  $1 \cdot 10^{-7}$  мбар. В накопительном кольце CERN ISR в экспериментах по спектроскопии чармония применялась водородная струйная мишень толщиной  $1 \cdot 10^{14}$  ат/см<sup>2</sup> [4,5]. Подробный

обзор параметров и конструкций внутренних мишеней, созданных в различных центрах, приведен в [6]. Следует отметить, что до настоящего времени внутренние мишени применялись в электронных или протонных накопительных кольцах, и при их работе давление в камере накопителя порядка  $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$  мбар было допустимым. В случае же комплекса HIRFL-CSR требования на вакуумные условия гораздо жестче, поскольку для обеспечения достаточного времени жизни пучка тяжелых ионов от углерода до полностью лишенных электронов ионов урана необходим вакуум выше  $5 \cdot 10^{-11}$  мбар.

Кластерная мишень была разработана и изготовлена в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера. В Институте современной физики она была оснащена вакуумным оборудованием и установлена в экспериментальном промежутке кольца CSRe, где и были проведены измерения параметров газовой струи и вакуумных условий в различных частях установки.

## 1. Конструкция и принцип работы мишени

Конструкция кластерной мишени состоит из трех вакуумных камер (см. Рис. 1,2).

Первая камера является источником кластерной струи, вторая – экспериментальным промежутком, в котором происходит взаимодействие ионного пучка со струей-мишенью, и третья камера является приемником струи.

Источник струи (Рис. 3) включает четыре ступени откачки: сопло-1<sup>ый</sup> скиммер (1-ая ступень, два турбомолекулярных насоса (ТМН) VARIAN 2000HT), 1<sup>ый</sup> скиммер-2<sup>ой</sup> скиммер (2-ая ступень, один ТМН VARIAN 1000), 2<sup>ой</sup> скиммер-3<sup>ий</sup> скиммер (3-ая ступень, один ТМН VARIAN 1000), 3<sup>ий</sup> скиммер-4<sup>ый</sup> скиммер (4-ая ступень, один ТМН VARIAN 1000). В установке использовано сходящееся-расходящееся коническое сопло с диаметром горловины 0.13 мм, при этом длина расходящейся части 40 мм, диаметр выходного отверстия 6.4 мм. Диаметры четырех скиммеров: 0.83 мм, 0.83 мм, 1.28 мм и 1.76 мм. Они были установлены на расстояниях от горловины сопла 60 мм, 153.5 мм, 243.5 мм и 321 мм соответственно. Расстояние от горловины сопла до ионного пучка 654 мм.

Кластеры образуются при адиабатическом расширении и охлаждении газа в сверхзвуковой части сопла, когда газ переходит в состояние пересыщения, и в потоке развивается процесс конденсации. Кластерный пучок формируется набором скиммеров, образуя интенсивный пучок с хорошо определенной границей. С целью получения высокой кластеризации в пучке температуру сопла необходимо поддерживать в диапазоне соответствующем давлению насыщающих паров, близком к давлению торможения.

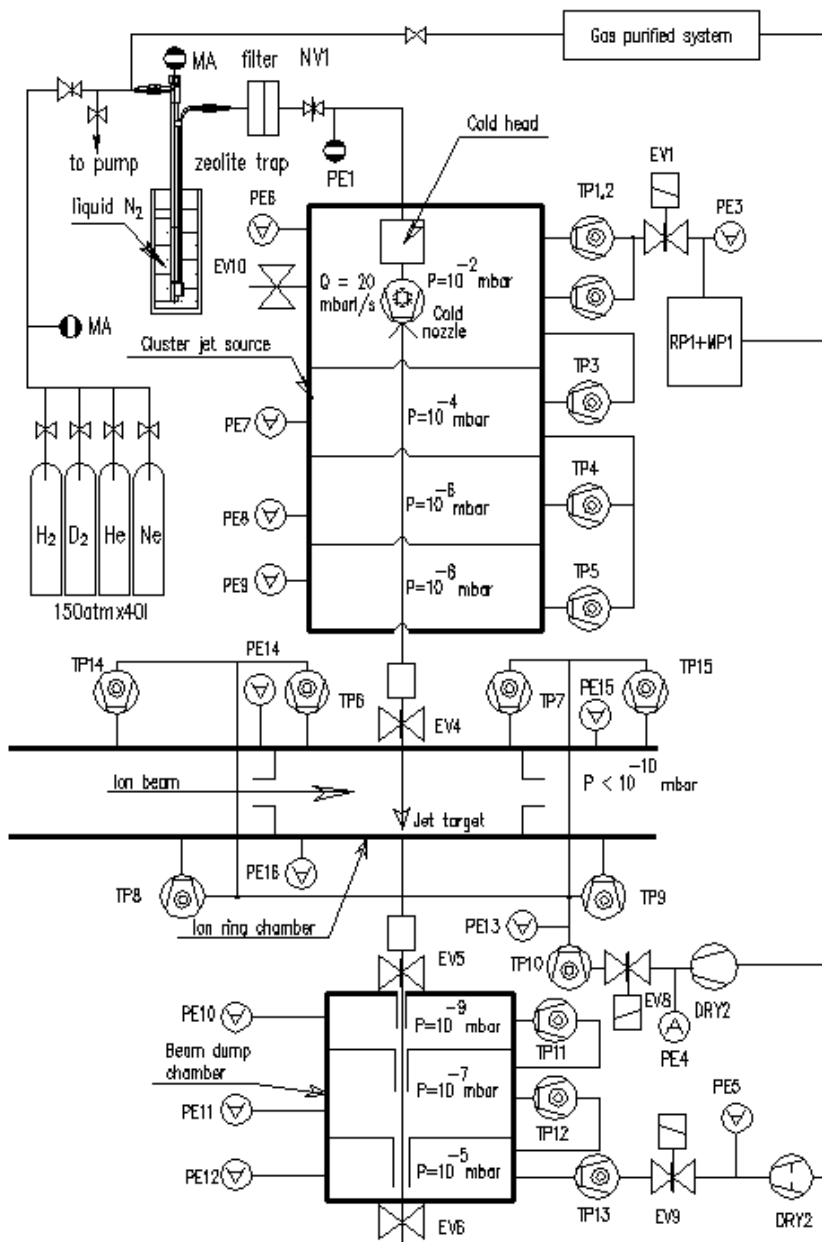


Рис.1. Принципиальная схема кластерной мишени.

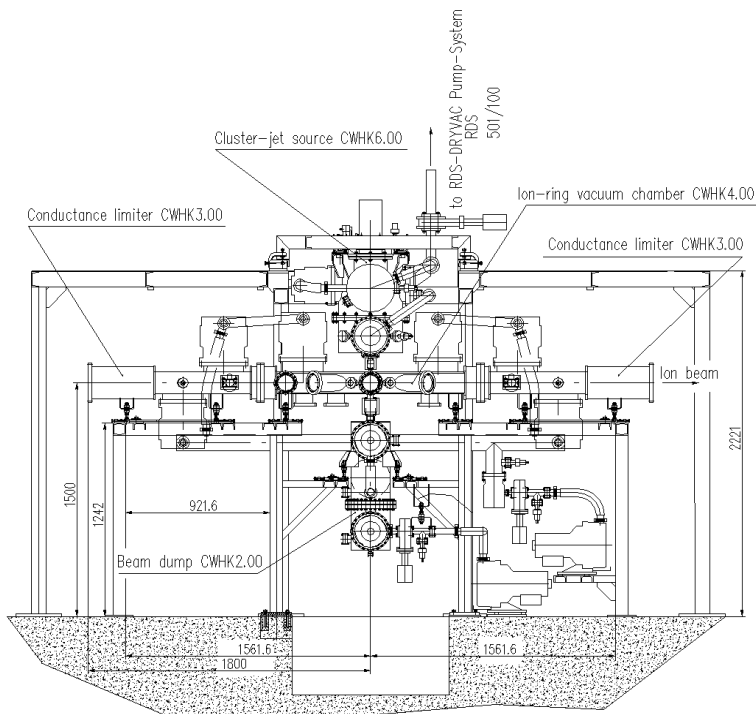


Рис. 2. Расположение элементов мишени.

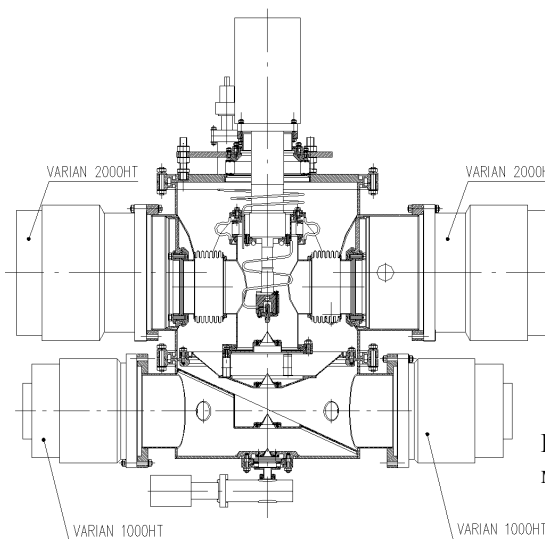


Рис. 3. Конструкция источника мишени.

Для этого сопло было установлено на второй ступени криогенератора и его температуру можно было изменять в диапазоне 20 – 300 К с помощью нагревателя. Для измерения температуры использовался медный термометр сопротивления, установленный на блоке сопла. Подводимый к соплу газ сначала охлаждался в теплообменнике, установленном на первой ступени криогенератора, а затем подводился к соплу. В случае высокой кластеризации газа можно предположить, что весь поток заключен внутри телесного угла, близкого к телесному углу раскрытия сопла. Поскольку тяжелые кластеры почти не ослабляются остаточным газом, то интенсивность кластерного пучка может быть записана в виде  $dI/d\Omega = Q/\Omega_{con.}$ , где  $Q$  – поток газа через сопло, а  $\Omega_{con.}$  – телесный угол раскрытия сопла. В нашем случае он равен 0.02 стерadians. Высокая кластеризация обычно имеет место при расходах газа порядка 10л·мбар/сек. Во второй ступени мишени установлена пневматическая заслонка, препятствующая распространению пучка далее.

При взаимодействии ионного пучка с кластерами возможно испарение последних за счет ионизационных потерь быстрых ионов, что может привести к повышению давления в накопителе. С целью уменьшения этого эффекта внутри экспериментального промежутка установлены подвижные ограничители газовой проводимости, позволяющие реализовать дифференциальную откачку во время проведения эксперимента. Шесть ТМН VARIAN 2000НТ используются в промежутке для получения сверхвысокого вакуума. Во время накопления ионного пучка ограничители раздвинуты и позволяют использовать всю необходимую для инъекции апертуру. Общий вид экспериментального промежутка без вакуумного оборудования приведен на Рис. 4.



Рис. 4. Фотография экспериментального промежутка без вакуумного оборудования.

Приемник струи служит для улавливания струи и уменьшения обратного потока газа в камеру накопителя. Он содержит три ступени дифференциальной откачки, каждая из которых откачивается насосом VARIAN 1000.

Для обеспечения рабочего вакуума в камере накопителя выше  $5 \cdot 10^{-11}$  мбар система откачки газа во всех узлах мишени должна быть достаточно эффективной. Особенно это касается источника струи, где поток газа порядка  $10 \text{ л} \cdot \text{мбар/сек}$  или более. Высокая скорость откачки необходима по всем видам газов, включая инертные. Кроме этого загрязнение камеры выделениями из уплотнений, смазкой или рабочими жидкостями должно быть исключено. Криогенные насосы могут удовлетворять перечисленным требованиям, однако их необходимо довольно часто регенерировать. Наиболее подходящими нам кажутся сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы, имеющие почти постоянную скорость откачки по всем газам в широком диапазоне давлений  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-10}$  мбар. Ранее были проведены исследования по получению высокого коэффициента компрессии насоса по водороду, когда на выхлопе большого ТМН был установлен ТМН с меньшей скоростью откачки [7]. Эти исследования показали, что в таком случае может быть получен предельный вакуум порядка  $1 \cdot 10^{-11}$  мбар. В источнике и приемнике струи применена дифференциальная откачка, и здесь выхлопы насосов ступеней с более высоким вакуумом были направлены в ступени с более низким вакуумом, как показано на Рис. 1.

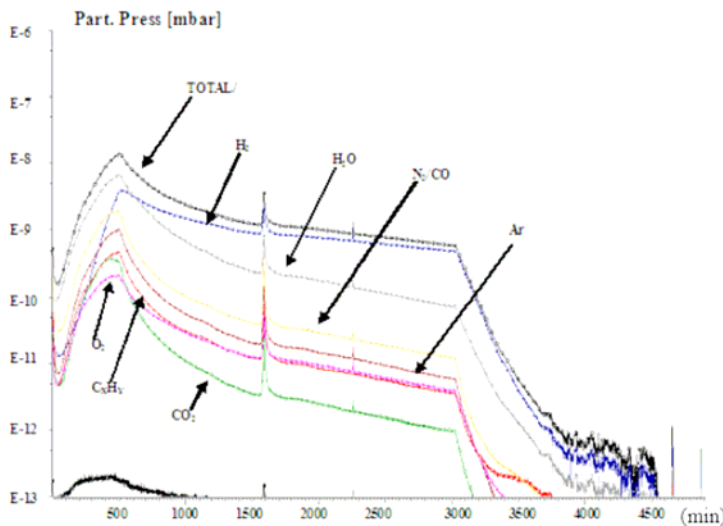


Рис. 5. Динамика давления в промежулке при прогреве.



## 2. Получение сверхвысокого вакуума в экспериментальном промежутке

После установки и выставки мишени были проведены испытания на отсутствие течей в уплотнениях мишени. Затем вакуумные клапаны, отсекающие источник и приемник от промежутка, были закрыты и промежуток был прогрет при шести работающих ТМН VARIAN 2000HT. Температура стенок камеры была доведена до  $250^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , и в течение 40 часов поддерживалась постоянной, а затем с той же скоростью была доведена до комнатной. Состав газовой смеси в камере контролировался в течение всего прогрева с помощью квадрупольного масс спектрометра и его зависимость от времени приведена на Рис. 5. Поскольку чувствительность масс спектрометра оказалась недостаточно высокой, для измерения вакуума была использована ионизационная лампа.

Предельное давление газа в камере оказалось равным  $9.0 \cdot 10^{-12}$  мбар, а при работающей мишени менее  $1.5 \cdot 10^{-11}$  мбар, что существенно лучше заложенных параметров при проектировании.

## 3. Измерение интенсивности струи

Поскольку перетекание остаточного газа из разных камер источника через отверстия в скиммерах было пренебрежимо мало, то интенсивность струи определялась по давлению газа в каждой ступени источника. На Рис.6 приведены значения давления аргона в четырех ступенях источника в зависимости от давления в камере сопла. При давлении порядка 1600 мбар начинается образование кластеров, и интенсивность струи резко возрастает, что хорошо видно на Рис. 7, где данные приведены в другом масштабе. При открывании клапана, соединяющего четвертую камеру источника с промежутком, давление в последней улучшается в четыре раза. Скорость откачки ТМН в четвертой камере была прокалибрована в диапазоне рабочих давлений и поэтому поток газа в струе, входящей в эту камеру, мог быть легко определен. Скорость откачки по аргону и водороду оказалась равной 600 л/сек и 2300 л/сек соответственно, без учета чувствительности лампы к разным газам. При идущей струе давление в промежутке менее  $1.5 \cdot 10^{-11}$  мбар, и при закрывании клапана приемника возрастает до  $4 \cdot 10^{-9}$  мбар, что говорит о хорошем улавливании струи приемником и малом испарении кластеров в камере накопителя. На Рис.7, справа, приведены величины давлений в ступенях источника в зависимости от температуры сопла для аргона.

Для водорода результаты аналогичных измерений приведены на Рис. 8. и Рис. 9. В отличие от аргона, зависимость интенсивности водородной струи, измеренная в четвертой камере, имеет явный пик при давлении 350 мбар.

Pressure in the chambers vs P nozzle ( Ar gas )

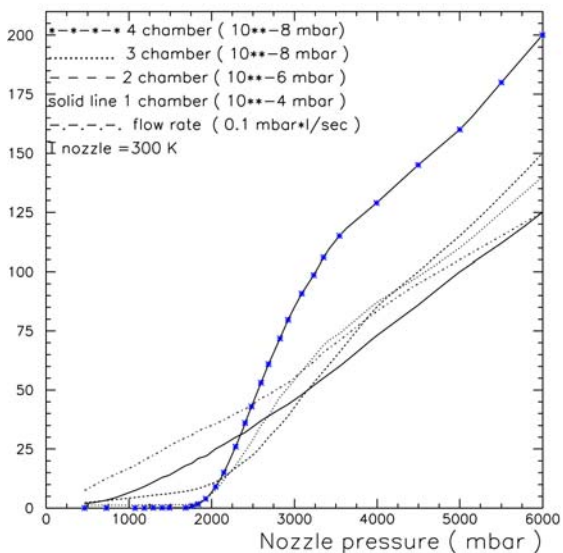


Рис. 6. Распределение давления по ступеням мишени и расход газа через сопло в зависимости от давления аргона перед соплом. Температура сопла комнатная.

Pressure in the 4th chamber vs P nozzle ( Ar gas )    Pressure in the chambers vs T nozzle ( Ar gas )

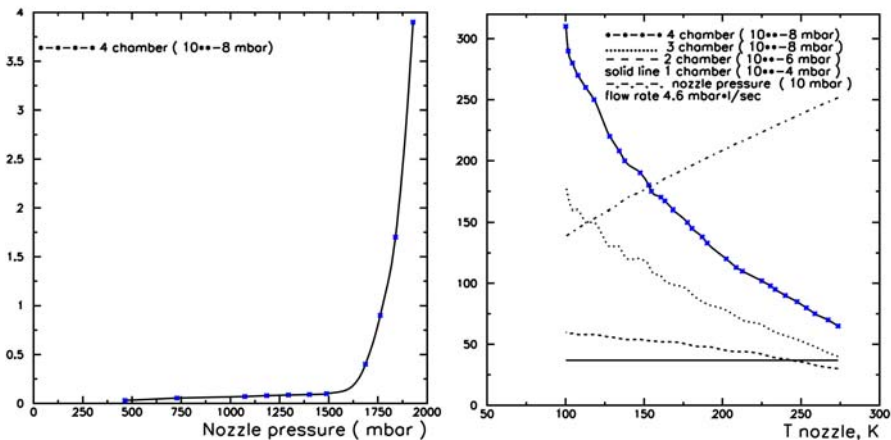


Рис. 7. Слева – зависимость давления в четвертой ступени мишени от давления газа перед соплом, справа – распределение давлений по ступеням в зависимости от температуры сопла при постоянном расходе газа через сопло.

Это давление соответствует расходу газа через сопло около 14 л · мбар /сек. По измеренной интенсивности были оценены плотности газовых струй из аргона и водорода в месте пересечения с ионным пучком, максимальные значения которых составили  $1.0 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> и  $1.75 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup>, соответственно.

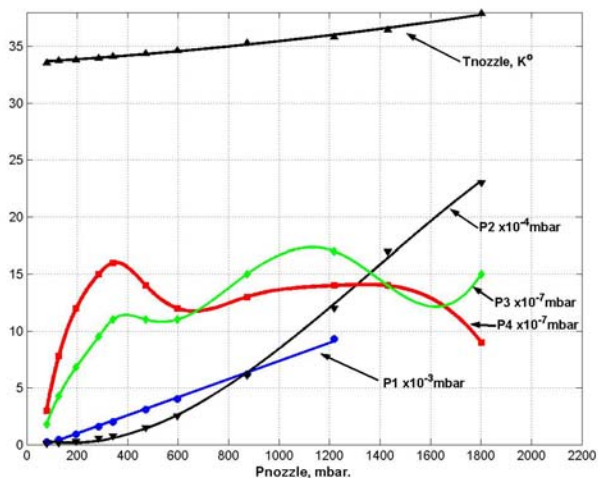


Рис. 8. Распределение давлений по ступеням мишени и температура сопла в зависимости от давления водорода перед соплом.

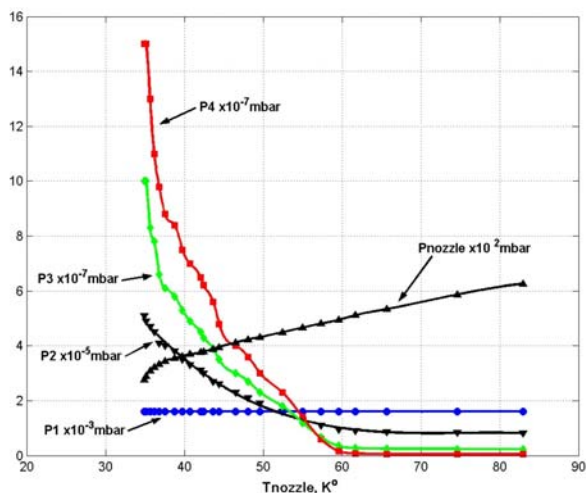


Рис. 9. Распределение давлений по ступеням и в камере сопла в зависимости от температуры сопла для водорода при постоянном расходе газа.

### 3. Заключение

Кластерная газовая мишень для накопителя тяжелых ионов HIRFL-CSR была установлена в прямолинейном промежутке кольца. Проведены измерения параметров струй из аргона и водорода. По измеренной интенсивности были оценены плотности газовых струй в месте пересечения с ионным пучком, которые составили  $1.0 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> и  $1.75 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> для Ar и H<sub>2</sub> соответственно. Толщины мишеней, в предположении, что струи имеют диаметр 3.6 мм и однородную плотность, составляют величины  $3.6 \cdot 10^{12}$  ат/см<sup>2</sup> и  $6.3 \cdot 10^{12}$  ат/см<sup>2</sup>. Предельное давление, полученное в экспериментальном промежутке, имеет величину  $9.0 \cdot 10^{-12}$  мбар, и повышается до величины не более чем  $1.5 \cdot 10^{-11}$  мбар при прохождении через него струи, что существенно меньше давления, ожидаемого при проектировании. Длительные, порядка 24 часов, прогоны мишени, в течение которых параметры струй изменялись в пределах нескольких процентов, показали высокую надежность ее работы.

Данная работа выполнена при частичной поддержке грантом 04-02-39007-ГФЕН2004-а РФФИ совместным с ГФЕН Китая.

### Литература

- [1] *J.W. Xia, et al.* Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A 488 (2002) 11.
- [2] *Xiaohong Cai, et al.* Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A 555 (2005) 15.
- [3] *П.И. Батурин, С.Г. Попов и Д.К. Топорков.* ЖТФ XLVI (1976) 637.
- [4] *M. Macri.* A cluster H<sub>2</sub> beam, R704 Collaboration Report, INFN, sezione di Geneva, 1985.
- [5] *C. Baglin, et al.* Charmonium spectroscopy at the ISR using an antiproton beam and a hydrogen gas jet target, Internal Report 85-01, CERN, 1985.
- [6] *C. Ekstrom.* Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A 365 (1995) 1-15.
- [7] *X. Cai, et al.* Vacuum 92(2003) 42 ( in Chinese).

*Д.К. Топорков, С.А. Зеваков, Б.А. Лазаренко, Д.М. Николенко,  
В.А. Полухин, Р.Ш. Садыков, Ю.В. Шестаков, Р. Лу,  
Ф. Руан, С. Цай, В. Цен, С. Цо, Д. Юй*

**Внутренняя газовая кластерная мишень  
для накопителя тяжелых ионов г. Ланьчжоу  
( Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR)**

*D.K. Toporkov, S.A. Zevakov, B.A. Lazarenko, D.M. Nikolenko,  
V.A. Polukhin, R.Sh. Sadykov, Yu.V. Shestakov, Rongchun Lu, Fangfang Ruan,  
Xiaohong Cai, Wenlong Zhan, Caojie Shao and Deyang Yu*

**Internal gas cluster target  
for Heavy Ion Research Facility Lanzhou – Cooler Storage Ring, HIRFL-CSR**

ИЯФ 2006-45

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 13.09. 2006 г.

---

Сдано в набор 19.09. 2006 г.  
Подписано в печать 20.09. 2006 г.  
Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 45

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринте “ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН”,  
Новосибирск., 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11