

УДК 53.096

**АНАЛИЗ СОСТАВА ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ
ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ**Д.С. Флусова, Д.К. Чумаков

Научный руководитель: с.н.с, к.ф.-м.н. Г.Н. Дудкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: dsf7@tpu.ru**THE MASS SPECTROMETRIC ANALYSIS OF RESIDUAL GASES IN PULSED ACCELERATOR
VACUUM CHAMBER**D.S. Flusova, D.K. Chumakov

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D. G.N. Dudkin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: dsf7@tpu.ru

***Abstract.** In accelerator experiments the control of residual atmosphere composition inside the vacuum chamber is necessary. The operative control over the content of gases may be performed using mass-spectrometers. In this report, the results of separate residual gases content inside the vacuum chamber are presented in evolution over time.*

Введение. При изучении на ускорителях реакций синтеза легких ядер в астрофизической области энергий (порядка единиц - десятков кэВ в с.ц.и), особые требования к чистоте остаточной атмосферы вакуумной камеры накладывает малая величина сечений этих реакций. Так, например, в диапазоне единиц-десятков кэВ в с.ц.и. для реакций $p + t \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$; ${}^3\text{He} + t \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ сечения не превышают сотен нанобарн [1, 2]. В случае использования твердотельных мишеней на ускорителях с импульсным режимом работы, происходит распыление материала мишени под действием ускоренного пучка падающих ионов. Таким образом, в атмосферу вакуумной камеры могут попасть легкие ядра имплантированных в мишень элементов (например, тритий из тритированных мишеней), а также осажденные газы и примеси – азот, кислород, углерод. Будучи ускоренными при работе ускорителя, эти сторонние ядра способны вызывать протекание нежелательных побочных реакций – например, реакций с выходом нейтронов $t + t \rightarrow {}^4\text{He} + nn$; $t + t \rightarrow {}^5\text{He} + n$ [2]. Появление нейтронного фона в результате протекания таких реакций может значительно осложнить получение достоверных экспериментальных данных о выходе исследуемых реакций, привести к активации окружающих материалов, выходу из строя аппаратуры. В связи с этим, необходимо оперативно оценивать состав газов в вакуумной камере до начала и во время проведения эксперимента.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования реакций синтеза легких ядер в астрофизической области энергий (единицы – десятки кэВ в с.ц.и.) проводятся на импульсном холловском ускорителе ионов ИДМ-40 с использованием мишеней из тритида титана на молибденовой подложке. Перед началом работы вакуумная камера откачивается до $9 \cdot 10^{-7}$ Торр с помощью системы из форвакуумного, турбомолекулярного и криогенного насосов. Затем, при подаче ускоряющего импульса,

в область ударной катушки вводится рабочий газ (водород или гелий-3), после чего ионизируется вихревым электрическим полем, индуцированным при подаче тока на ударную катушку. В дальнейшем, ионы ускоряются в межэлектродном промежутке и падают на мишень из тритида титана, нанесенную на молибденовую подложку методом Сивергса.

Таким образом, в диапазоне 1-6 а.е.м. в камере могут находиться следующие газы: одиножды ионизованные водород H, дейтерий ^2H (как примесь в напускаемом водороде), тритий ^3H (выбиваемый в результате распыления мишени при падении на нее ускоренных ионов водорода) и их молекулярные комбинации; гелий-3 (результат β -распада трития), дважды ионизованный углерод, осколки органических соединений.

Для контроля состава остаточных газов на ускорителе ИДМ-40 применяется квадрупольный масс-спектрометр Extort XT100, достаточно компактный для установки на ускорителе. Разрешающая способность 1 а.е.м. на 10% высоты пика не гарантирует различение близко лежащих линий (например, трития и гелия-3), но позволяет получить информацию о парциальных давлениях газов на целых числах а.е.м. Ионизация анализируемых проб газа производится электронами с энергией 70 эВ.

Определение состава газов, парциального давления трития представляет сложность без математической обработки масс-спектра. Более точно установить выход трития из мишени в результате распыления поверхности ионами водорода можно, анализируя масс-спектр после полного дневного рабочего сеанса. Кроме того, эволюцию всей системы газов в вакуумной камере можно определить, установив вклад криогенного и турбомолекулярного насосов по отдельности.

В связи с этим, было предложено провести ряд экспериментов с различными условиями снятия масс-спектров: в рабочем состоянии (оба насоса функционируют); с перекрытым криогенным насосом; с перекрытым турбомолекулярным насосом; с отключенным криогенным и перекрытым турбомолекулярным насосами.

Анализ полученных масс-спектров был произведен с помощью скрипта, написанного на языке Python с использованием библиотек NumPy и SciPy. Скрипт включает в себя автоматизированное извлечение из файла масс-спектра даты, времени и длительности снятия спектра, а также самих данных. Данные затем подвергались обработке набором гауссианов таким образом, чтобы итоговый приведенный χ^2 был минимальным. Площади под гауссианами, соответствующими отдельным пикам, записывались в отдельный файл-таблицу, где значения площадей ставились в соответствие отдельному спектру, снятому в ходе эксперимента. Таким образом, по изменению значений площадей под пиками можно было установить ход изменений в составе газов внутри вакуумной камеры.

Скрипт позволяет производить обработку поступающих масс-спектров в режиме реального времени. Наконец, для большей наглядности, полученные масс-спектры и результаты обработки экспериментальных данных гауссианами были отображены графически в линейной и полулогарифмической (по парциальным давлениям) шкалам и сведены в анимацию, показывающую визуально изменение состава газов в вакуумной камере.

Результаты. Полученные в ходе экспериментов масс-спектры были подвергнуты обработке скриптом, после чего значения площадей под пиками были сведены в отдельные таблицы по каждому эксперименту.

В первом эксперименте были получены «опорные» спектры, соответствующие нормальному режиму работы вакуумной системы – со временем парциальное давление газов падало.

Во втором эксперименте криогенный насос был отключен и перекрыт; работал только турбомолекулярный насос. В этом случае также наблюдалось постепенное снижение парциального давления для всех пиков, увеличения давления для атомарного или молекулярного водорода не наблюдалось. Это связано с тем, что затвор, соединяющий криогенный насос и вакуумную камеру, был перекрыт – соответственно, газы, выходящие из криопанели по мере ее нагрева, не могли попасть в камеру. В то же время, на 3 а.е.м. наблюдалось незначительное увеличение, потенциально связанное с измерением значений давления около предела чувствительности масс-спектрометра. Если же принимать его во внимание, то оно может свидетельствовать о малой пригодности турбомолекулярных насосов для откачки гелия-3.

В третьем эксперименте работал только криогенный насос, а турбомолекулярный был перекрыт. Полученные результаты мало отличаются от представленных в первом эксперименте – наблюдалось общее снижение парциального давления газов. Исходя из этого, можно заключить о максимальной эффективности криогенного насоса при откачке легких газов.

В последнем, четвертом эксперименте криогенный насос был отключен и постепенно нагревался при отсеченном с помощью затвора турбомолекулярном насосе. В этом случае со временем и, соответственно, ростом температуры криопанелей, росло парциальное давление на 2 а.е.м, что соответствовало молекулярному водороду; соотношение «молекулярный водород – атомарный водород» увеличивалось. В дальнейшем, при температурах криопанелей свыше 50 К наблюдались хорошо аппроксимируемые гауссианами пики на 3 и 6 а.е.м, превышающие по амплитуде предел чувствительности масс-спектрометра.

Заключение. В результате анализа с помощью выделения пиков гауссовской формы масс-спектров, полученных в ходе серий экспериментов, была установлена оценочная зависимость содержания газов в вакуумной камере от условий откачки. Так, в результате отключения криогенного насоса, по мере его нагревания увеличивается парциальное давление молекул водорода H_2 , стекающих по мере разморозки криопанели обратно в камеру. То же касается и трития, однако в этом случае помимо увеличения давления на 6 а.е.м., происходит рост давления на 3 а.е.м., вызванный возвратом атомов гелия-3 и диссоциацией молекул трития. Точное установление эволюции состава газов с имеющейся точностью масс-спектрометра невозможно и потребует либо решения кинетического уравнения системы, либо применения более сложных систем (например, тандемных масс-спектрометров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bystritskii V.M. et al. Effect of pd and dd Reactions Enhancement in Deuterids TiD_2 , ZrD_2 and Ta_2D in the Astrophysical Energy Range // *Physics of Particles and Nuclei: Scientific Journal*. – 2016. – Vol. 13, No. 1. – P. 79-97.
2. Bystritsky V.M. et al. Pulsed ion hall accelerator for investigation of reactions between light nuclei in the astrophysical energy range // *Physics of Particles and Nuclei: Scientific Journal*. — 2017. — Vol. 48, Iss. 4. – P. 659–679.