

P9-2013-66

А. В. Нестеров, А. В. Бутенко, А. О. Сидорин

ГЕТТЕРНЫЙ НАСОС
И ЕГО РАБОТА В ОТКАЧНОЙ СИСТЕМЕ
ПУЧКОВОЙ КАМЕРЫ НУКЛОТРОНА

Нестеров А. В., Бутенко А. В., Сидорин А. О.

P9-2013-66

Геттерный насос и его работа в откачной системе пучковой камеры нуклотрона

По завершении модернизации вакуумной системы на нуклотроне был проведен ряд экспериментальных исследований давления и состава остаточного газа в пучковой камере при различных параметрах цикла магнитного поля. Основной целью являлась оптимизация работы откачных средств, в том числе исследование возможности использования на нуклотроне насосов на основе нераспыляемых геттеров. Выполненная работа показала, что геттерный насос может с успехом заменить или дополнить существующие откачные средства.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Nesterov A., Butenko A., Sidorin A.

P9-2013-66

Getter Pump and Its Work in Pumping System of the Nuclotron Beam Pipe

After modernization of the Nuclotron vacuum system a series of experimental investigations of composition and pressure of the residual gas in the beam pipe were performed at different parameters of the magnetic field cycle. The main goal was optimization of work of the vacuum pumps and, in particular, investigation of a possibility to use at the Nuclotron a pump on the basis of non-evaporated getter. The performed work has shown that the getter pump can successfully exchange or complement the existing vacuum pumps.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования на ускорительном комплексе нуклотрон вакуумных насосов на основе высокопористых нераспыляемых геттеров обсуждалась достаточно давно [1, 2]. Их привлекательность связана с тем, что нераспыляемые геттеры просты и надежны в обращении и обладают высокой скоростью откачки водорода. Будучи единожды активированными, они сохраняют способность откачивать газы длительное время, которое может достигать нескольких лет, и не требуют в течение этого периода какого-либо обслуживания. Поток газов, способных «отравлять» геттер, во время работы сверхпроводящего ускорителя весьма незначителен. А это значит, что в течение сеанса скорость откачки будет оставаться практически постоянной. На работу насосов не влияет наличие электрических и магнитных полей, да и сами они не создают помех. Немаловажным фактором является отсутствие необходимости отсекал геттер шибером, что повышает надежность и удешевляет всю вакуумную систему.

Основным фактором, препятствовавшим широкому внедрению геттерных насосов для откачки пучковой камеры нуклотрона, являлось отсутствие информации о составе остаточного газа при работе ускорителя. Изменение магнитного поля во время цикла приводит к разогреву стенок пучковой камеры и десорбции газов с ее поверхности. Динамика этого процесса в условиях, когда стенки камеры находятся при температуре жидкого гелия, ранее не исследовалась из-за отсутствия адекватных диагностических средств. Поэтому при подготовке проекта модернизации вакуумной системы нуклотрона для сглаживания этого эффекта было решено использовать турбомолекулярные и магниторазрядные насосы.

В ходе модернизации вакуумной системы, начатой в 2007 г., были устранены основные источники повышенного газовыделения в высоковакуумный объем, полностью реконструирован участок внутренней мишени — «теплый» участок, кроме криогенной откачки на камеру были поставлены 18 турбомолекулярных насосов. В результате интегральное значение давления в пучковой камере нуклотрона было уменьшено до $p \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ Па. Таким образом, требования к давлению остаточного газа в пучковой камере нуклотрона, определенные основными режимами работы ускорителя в составе комплекса NICA

и заложенные в проекте «Нуклотрон-М», в ходе 40-го сеанса были полностью выполнены. Новое качество состояния вакуумной системы было продемонстрировано в ходе успешного эксперимента по ускорению ионов ксенона, проведенного в 41-м сеансе (март 2010 г.) [3].

Не менее важным результатом модернизации явилось создание современной системы диагностики, включающей в себя 46 датчиков давления разного типа и масс-спектрометр «Prisma Plus» фирмы «Pfeiffer». Кроме того, была разработана, смонтирована и запущена полномасштабная система автоматизированного контроля и управления (АСУ) параметрами модернизированной вакуумной системой нуклотрона с несколькими уровнями блокировок и защит. Опытная эксплуатация АСУ была начата в ходе 40-го сеанса. К началу 41-го сеанса монтаж и тестирование оборудования были завершены. Главная консоль АСУ, установленная на пульте управления линейного ускорителя ЛУ-20, собрана на основе PLC-контроллера «Siemens» серии 300 и оснащена сенсорной панелью для отображения текущего состояния оборудования и оперативного управления всеми элементами высоковакуумной системы. В состав АСУ входит промышленный компьютер, который используется для сбора, обработки, отображения в реальном времени и архивирования параметров вакуумной системы: показаний датчиков давления, состояния и режимов работы блоков питания магниторазрядных и турбомолекулярных насосов в течение всего сеанса работы.

Использование новой системы автоматизированного управления обеспечило возможность проводить регулярные, начиная с 40-го сеанса, измерения давления и состава остаточного газа в кольце нуклотрона. Так, например, в ходе 41-го сеанса был проведен ряд экспериментальных исследований поведения состава остаточного газа при охлаждении кольца и динамического вакуума при различных параметрах цикла магнитного поля и режимах работы ускорителя. Основной целью этих исследований является оптимизация работы откачных средств, в том числе исследование возможности использования на нуклотроне геттерных насосов, испытания которых проводятся непосредственно на пучковой камере ускорителя начиная с 43-го сеанса [7].

1. НАСОСЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ГЕТТЕРОВ

Геттером является материал, поглощающий газы. В атмосфере этот материал сразу же покрывается пленкой окислов и нитридов. Чтобы привести нераспыляемый геттер в действие, надо разрушить поверхностную пленку и обеспечить доступ газов к материалу, т. е. активировать геттер. Активация производится нагревом до определенной для каждого конкретного геттера температуры. В процессе активации большую роль играет водород. Геттеры

отличаются образованием с водородом твердых растворов. Выделяясь при нагреве, водород разрушает поверхностную пленку химических соединений. Этот вывод сделан на основании того, что откачной эффект у геттера появляется при температурах гораздо ниже активационных. Главное условие: чтобы из геттера начал выделяться водород.

Рабочими элементами нераспыляемого геттерного насоса являются высокопористые титановые стержни, температура активации которых составляет 650°C , или стержни из сплава титана с ванадием, который активируется при 350°C [4, 5]. Скорость откачки зависит от величины поверхности геттера. Для водорода она составляет $2 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$, для остальных газов — $1 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$. Существенной откачки геттером инертных газов не наблюдается. Скорость откачки геттеров, в отличие от большинства других насосов, остается постоянной при любом разрежении (например, у магниторазрядного насоса она падает с 200 до 2 л/с при давлении ниже $1 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$).

Необходимость активации геттера при высокой температуре налагает повышенные требования к прочности конструкции и надежности нагревателя. Несмотря на это, геттерные насосы достаточно просты в изготовлении, и поэтому их стоимость существенно ниже, чем у высоковакуумных насосов других типов. В качестве примера на рис. 1 изображен макет геттерного насоса из титановых стержней сечением $4 \times 6 \text{ мм}^2$, который использовался для откачки пучковой камеры нуклотрона в 44-м сеансе (декабрь 2011 г.).

Наиболее наглядно особенности работы геттерного насоса проявляются при его использовании в качестве основного откачного средства в составе небольшого вакуумного стенда, предназначенного для тестирования различного оборудования. При этом, как правило, необходимо получить вакуум лучше 10^{-4} Па , при старте иногда даже с форвакуума и газовой нагрузке $10^{-4} - 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{торр/с}$. Особенность ситуации заключается в том, что при использовании геттерного насоса предельный вакуум чаще определяется не соотношением нагрузки и скорости откачки, а количеством инертных газов, оставшихся в объеме после предварительной откачки.

Подобный стенд с умеренным натеканием был создан для тестирования масс-спектрометра «Prisma Plus» (рис. 2). К трубе диаметром 70 мм и длиной 250 мм были присоединены спектрометр и клапан предварительной откачки

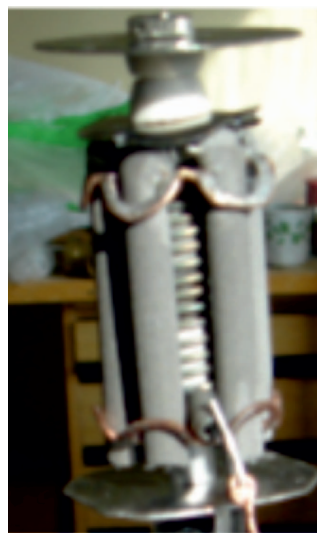


Рис. 1. Макет геттерного насоса



Рис. 2. Стенд для тестирования спектрометра

с витонвым уплотнением. Внутри трубы находились геттер и вакуумный датчик ПММ 31 инверсно-магнетронного типа. Предварительное разрежение $1 \cdot 10^{-2}$ Па было получено при помощи откачной системы течеискателя.

В течение нескольких недель в стенде поддерживался вакуум $3 \cdot 10^{-5}$ Па. Спектр остаточного газа (рис. 3) полностью определялся инертными газами:

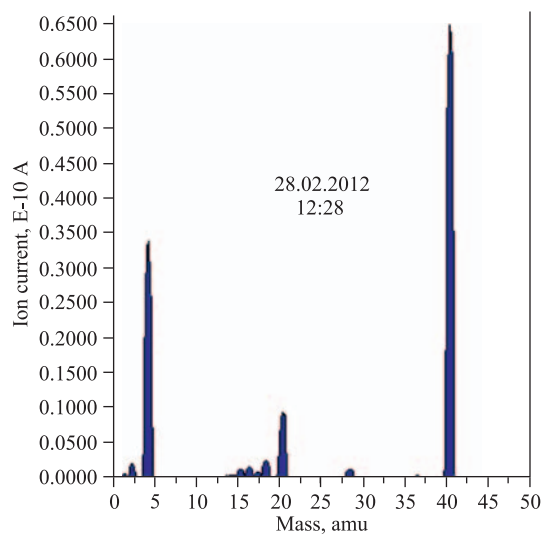


Рис. 3. Спектрограмма остаточного газа до активации геттера

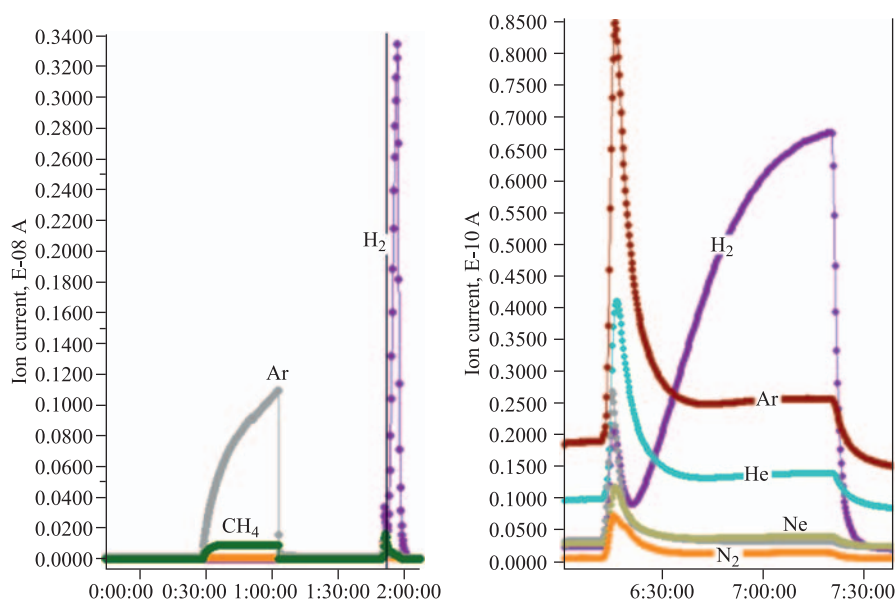


Рис. 4. Эволюция состава остаточного газа при выключении инверсно-магнетронного датчика (левая спектрограмма) и при активации геттера (правая спектрограмма)

гелием, аргоном и неоном. Их откачка производилась не чем иным, как датчиком давления. Если учесть относительную чувствительность анализатора по различным газам, то бесспорным лидером окажется гелий: $21 \cdot 10^{-11}$ А; аргон давал сигнал $5 \cdot 10^{-11}$ А, неон — $3,3 \cdot 10^{-11}$ А. В момент снятия спектра давление в стенде составляло $6,0 \cdot 10^{-5}$ Па.

При выключении датчика (рис. 4, левая спектрограмма) начинают расти пики инертных газов, и появляется метан (CH₄). Естественно, этих газов будет тем меньше, чем лучше подготовлена и обезгажена система. Пик водорода в правой части спектрограммы соответствует началу активации геттерного насоса.

При активации геттера выделяющийся водород полностью определяет давление $2,3 \cdot 10^{-4}$ Па в объеме (рис. 4, правая спектрограмма), это позволяет определить чувствительность анализатора по водороду, которая составляет $1 \cdot 10^{-10}$ А = $7 \cdot 10^{-6}$ Па. С повышением температуры увеличивается скорость диффузии химических соединений газов, соответственно, возрастает и скорость их откачки. Сначала давление в объеме увеличивается — с поверхности титана слетает адсорбированный газ. Через некоторое время рост давления сменяется его уменьшением: происходит увеличение скорости откачки. При дальнейшем нагреве количество азота не изменяется, хотя возрастает его по-

ток со стенок камеры. Это может происходить только в том случае, если продолжается рост скорости откачки. Из этой же спектрограммы мы видим, что после завершения активации количество инертных газов несколько уменьшается, значит, сорбционные процессы на поверхности геттера касаются и их.

2. СТРУКТУРА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ НУКЛОТРОНА, ЭВОЛЮЦИЯ ДАВЛЕНИЯ И СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО ГАЗА В ЦИКЛЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Структура вакуумной системы нуклотрона после модернизации приведена на рис. 5 [8]. Нумерация постов откачки соответствует нумерации элементов оптической структуры, в окрестности которых они установлены. Точка инъекции пучка, где пучковая камера нуклотрона соединена с камерой канала транспортировки из линейного ускорителя ЛУ-20, расположена между постами 8Д4 и 1Ф3.

На участке медленного вывода (на рис. 5 соответствующий пост обозначен ЭСС — электростатический септум) пучковая камера сообщается с изоляционным вакуумным объемом. Это одно из проблемных мест вакуумной си-

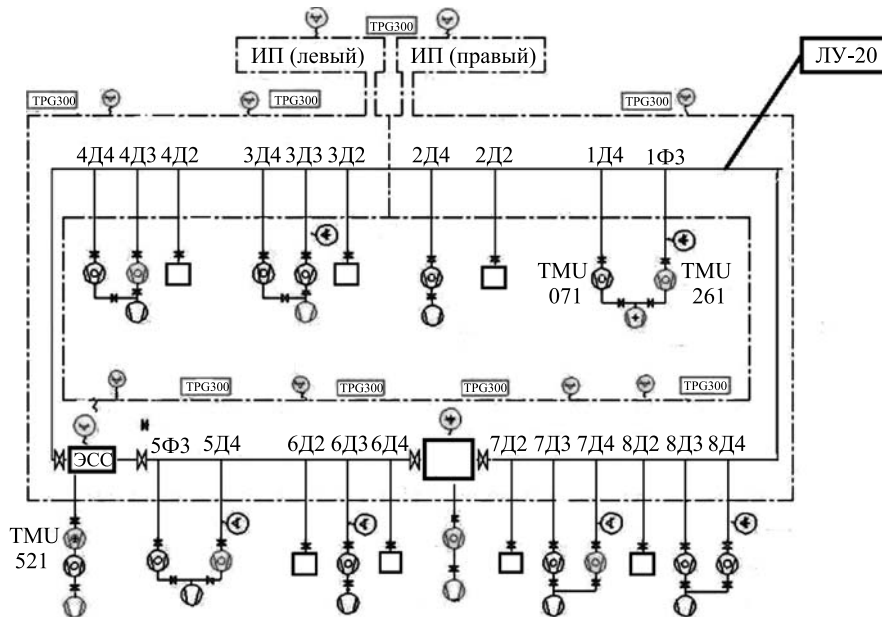


Рис. 5. Структура вакуумной системы нуклотрона: штрихпунктирной линией обозначен изоляционный вакуумный объем; ИП — измерительные периоды

стемы, поэтому первоначально масс-спектрометр был установлен на пост 4Д4, расположенный в непосредственной близости от септума. В ходе сеанса было установлено, что при подаче цикла магнитного поля в этой точке начинает превалировать пик гелия, который, наиболее вероятно, поступает из изоляционного вакуумного объема. При подключении тандема турбомолекулярных насосов, установленного на вакуумном посту септума, пик гелия уменьшался до уровня водорода. При закрытии шиберов на посту ЭСС происходил рост давления: на посту 5Ф3 с 2,4 до $4,2 \cdot 10^{-7}$ Па; на посту 5Д4 с 1,9 до $4,2 \cdot 10^{-7}$ Па и на посту 4Д4 с 2,7 до $3,1 \cdot 10^{-7}$ Па. На посту 4Д3 датчик давления отсутствует, и о влиянии турбины здесь мы можем судить только по датчику 4Д4. При отсеченном от камеры насосе на 4Д4 закрытие шиберов на 4Д3 дает увеличение давления с 3,1 до $3,8 \cdot 10^{-7}$ Па.

Таким образом, установлено, что газовый поток идет именно из участка медленного вывода и он практически полностью перехватывается турбомолекулярными насосами, размещенными на постах ЭСС, 5Ф3, 5Д4, 4Д4 и 4Д3. А при закрытии шиберов на постах 3Д3 и 3Д4, достаточно удаленных от участка медленного вывода, их датчики показали улучшение вакуума с 1,4 до $1,1 \cdot 10^{-7}$ Па. Это объясняется тем, что предельный вакуум турбомолекулярного насоса ТМУ 071, измеренный на стенде при отсутствии нагрузки с прогретым измерительным колпаком, составляет примерно $3 \cdot 10^{-7}$ Па. Значит, на участках, удаленных от источника натекания, превалирует криогенная откачка «холодными» стенками вакуумной камеры, именно она и определяет предельный вакуум в пучковой камере.

Другим потенциальным источником ухудшения вакуума при подаче цикла магнитного поля может являться «грязь» на стенках вакуумной камеры, образовавшаяся при разложении масла, мигрирующего в пучковую камеру нуклотрона. Продукты разложения масла образуют на стенках вакуумной камеры пористую пленку, которая при охлаждении ускорителя работает как криосорбционный насос, а при подаче цикла магнитного поля разогревается и «возвращает» абсорбированные газы обратно в вакуумную камеру. К проблемным участкам с этой точки зрения относятся: канал инжекции, по которому масло мигрировало из вакуумной системы ЛУ-20, и посты 1Ф3, 4Д4 и 6Д3, где некоторое время находились посты предварительной откачки с «масляными» насосами.

Этот эффект исследовался в ходе 43-го сеанса, когда спектр-анализатор был установлен на посту 8Д2. Наиболее показательное поведение давления в камере при выключенных насосах на постах 8Д4 и 7Д4. Непосредственно после подачи цикла магнитного поля показания датчика 7Д4 не изменяются, а давление в области датчика 8Д4 за несколько минут увеличивается от $8 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ Па. По спектру остаточного газа хорошо видно, что в камеру поступает водород, который далее начинает распространяться по камере, пока не произойдет выравнивание его концентрации по кольцу. Этот процесс раз-

вивается очень медленно из-за малой проводимости камеры, особенно при криогенных температурах, поэтому удаленные от канала инъекции посты реагируют на подачу цикла с большой задержкой по времени. При снятии цикла давление в точке 8Д4 начинает быстро снижаться и за несколько минут возвращается к исходному значению (насосы при этом по-прежнему выключены). Это означает, что пористая пленка на стенках вакуумной камеры при охлаждении поглощает ранее выделившийся водород.

По реакции датчиков на подачу цикла магнитного поля без откачки камеры было определено, что загрязнение стенок вакуумной камеры имеется возле канала инъекции — примерно на 15 м в обе стороны. Именно здесь использование геттерных насосов, благодаря их высокой скорости откачки по водороду, представляется наиболее перспективным. На этом участке расположены 4 турбомолекулярных и один магниторазрядный насос. Исследования, проведенные в последующих сеансах, были посвящены сравнению эффективности применения этих насосов и насоса на основе нераспыляемого геттера.

3. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕТТЕРНОГО И МАГНИТОРАЗРЯДНОГО НАСОСОВ

В ходе того же 43-го сеанса (март 2011 г.) было проведено сравнение работы геттерного и магниторазрядного насосов (МРН), для чего на посту 8Д2

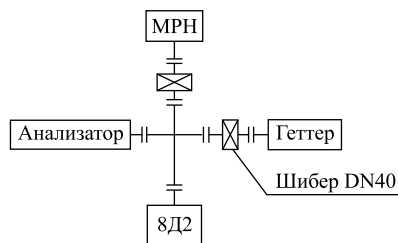


Рис. 6. Схема размещения вакуумного оборудования на посту откачки 8Д2; МРН — магниторазрядный насос

был установлен макет геттерного насоса со скоростью откачки по водороду 40 л/с (рис. 6). Каждый насос мог отсекается своим шибером. Результаты их работы контролировались масс-спектрометром. Все это позволило сравнить работу обоих насосов при разной нагрузке (в зависимости от цикла магнитного поля). Исследование носило качественный характер, так как геттер уступал МРН по эффективной скорости откачки в районе спектрометра в два

раза. Кроме того, геттер был поставлен «с атмосферы» перед сеансом, и ни он, ни шибер DN40 не успели обезгазиться в той же мере, что и МРН.

Спектрограмма, представленная на рис. 7, была снята после 24 ч работы ускорителя при цикле поля с амплитудой 12 кГс. Давление в пучковой камере стационарно и полностью определяется содержанием водорода. На начальном участке зависимости шибера на МРН и геттере перекрыты, и спектрометр показывает установившуюся концентрацию водорода в точке его размещения. Затем был открыт шибер на МРН (примерно в 8.30), это соответствует

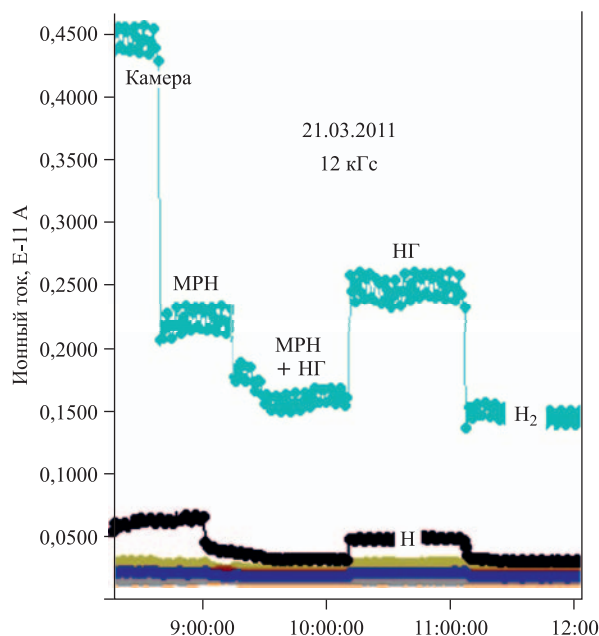


Рис. 7. Спектрограмма остаточного газа на посту откачки 8Д2 при работе ускорителя с циклом поля амплитудой 12 кГц; НГ — насос геттерный

резкому снижению концентрации водорода примерно в 2 раза. Примерно через 40 мин был открыт шибер на геттерном насосе, что привело к дополнительному снижению содержания водорода. После этого примерно на час был перекрыт шибер на магниторазрядном насосе, и откачка производилась только геттером. Затем шибер на МРН был снова открыт. Напомним, что скорость откачки геттера в районе масс-спектрометра в два раза меньше, чем у магниторазрядного насоса. Несмотря на это, геттер показал себя весьма достойно.

Вопрос об эффективности использования МРН для откачки камеры ну-клотрона требует отдельного рассмотрения. Дело в том, что сам по себе магниторазрядный насос является своеобразным генератором водорода. При электрическом разряде разлагаются образующиеся на поверхности титанового катода метан (СН₄) и вода (Н₂О). Появляется большое количество водорода (Н₂) и окиси углерода (СО). Водород превалирует в составе остаточного газа насоса [6]. Результат же откачки определяется соотношением количества водорода, поступающего из камеры и из самого насоса.

При работе с циклом поля небольшой амплитуды (рис.8) количество водорода в камере на порядок меньше. Если оно при этом меньше, чем в

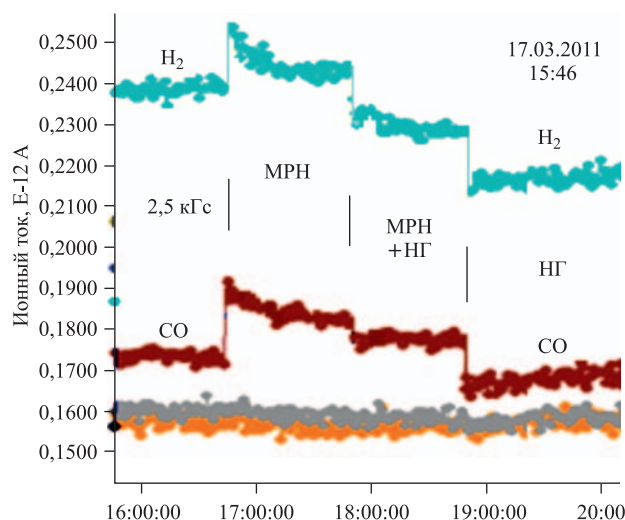


Рис. 8. Спектрограмма остаточного газа на посту откачки 8Д2 при работе ускорителя с циклом поля амплитудой 2,5 кГц

отсеченном шибером магниторазрядном насосе, то, при открытии шибера, избыточный газ перемещается из насоса в камеру и происходит увеличение давления, что видно на рис. 8. То же самое относится и к CO. Как только к работе подключается геттер, он начинает качать и водород, и окись углерода.

4. ГЕТТЕР И ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС

В 44-м сеансе (ноябрь–декабрь 2011 г.) масс-спектрометр был переставлен на пост 8Д3, где вместо магниторазрядного установлен турбомолекулярный насос (ТМН). Там же был установлен и геттерный насос (рис. 9). Схема размещения оборудования аналогична приведенной на рис. 6.

Пост 8Д3 отличается одним из самых высоких десорбционных потоков во время работы ускорителя, поэтому был разработан геттерный насос со скоростью откачки по водороду 100 л/с, что в два раза выше, чем у ТМН. За счет сопротивления шибера и присоединяющих трубопроводов скорость откачки обоих насосов в районе анализатора примерно одинаковая.

Проведенное посредством масс-спектрометра исследование показало, что разработанный геттерный насос ни в чем не уступает турбомолекулярному (рис. 10). На рисунке видно, что при цикле до 2 кГц в месте измерения преобладают пары воды. Причем если геттер производит их откачку, то ТМН (вместе со своим шибером), наоборот, увеличивает их количество. Но уже при

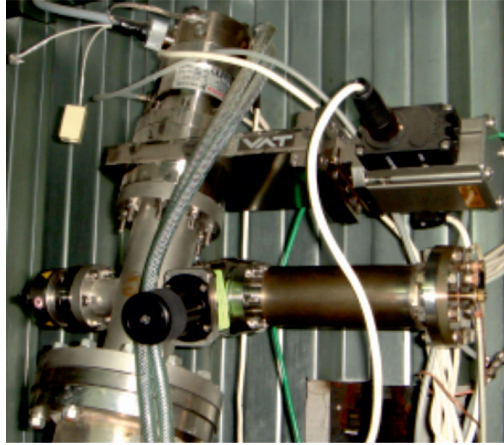


Рис. 9. Геттерный насос на посту откачки 8Д3

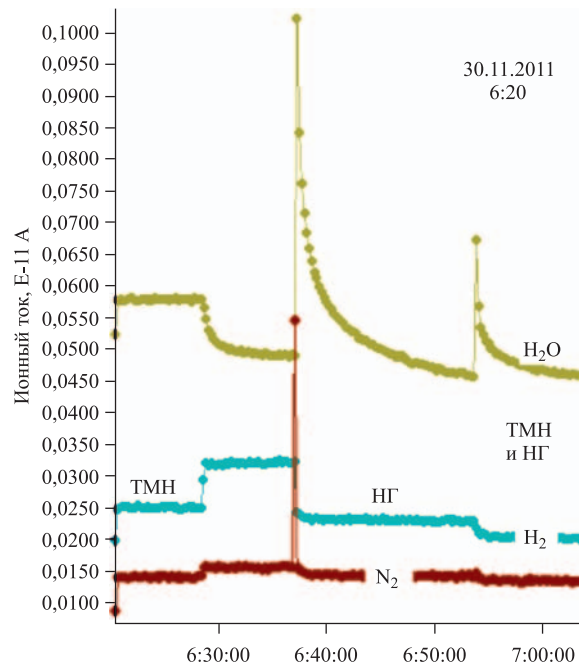


Рис. 10. Спектрограмма остаточного газа на посту откачки 8Д3 при работе ускорителя с циклом поля амплитудой 2 кГс. Начальный момент времени соответствует открытию шибера на ТМН, около 6.30 этот шибер снова закрыт, через 10 мин открыт шибер на геттерном насосе, еще через 20 мин открыт шибер на ТМН

цикле 5 кГц все изменение давления происходит только за счет водорода, и вклад насосов в откачку камеры можно определять посредством вакуумного датчика.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕТТЕРНЫХ НАСОСОВ

В 45-м сеансе (февраль–март 2012 г.) геттерный насос на посту 8ДЗ эксплуатировался в качестве штатного откачного средства. Между сеансами геттер два месяца был отсечен шибером. В момент подсоединения геттера к камере, которая двое суток откачивалась турбинами, давление сразу упало,

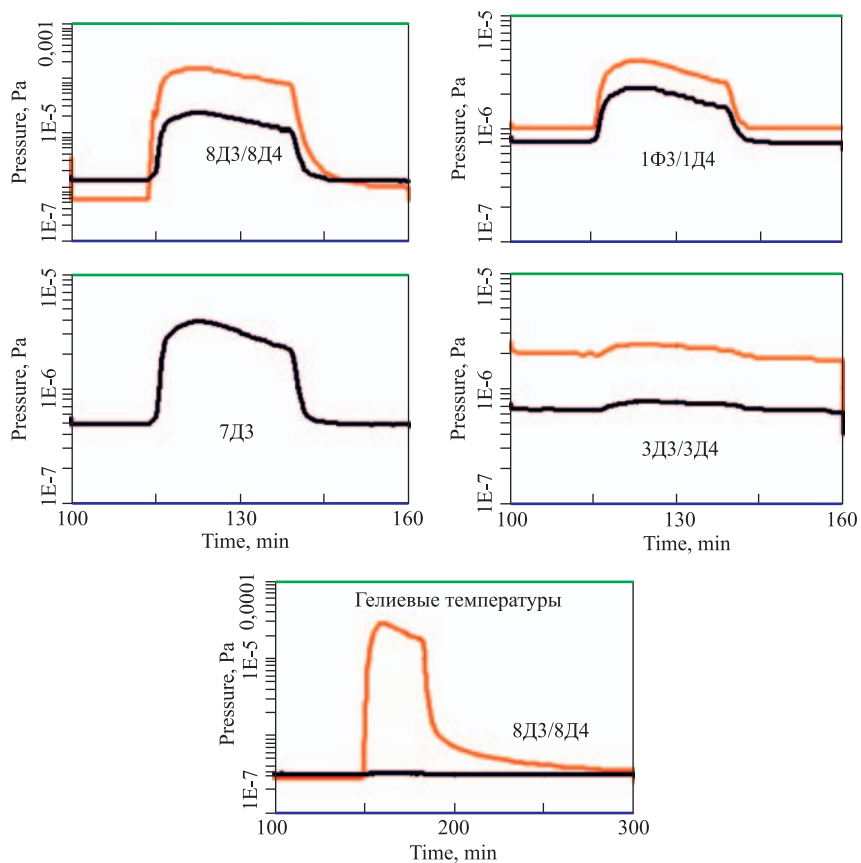


Рис. 11. Динамика изменения давления остаточного газа при активации геттерного насоса, размещенного на посту откачки 8ДЗ: верхние кривые — при температуре стенок камеры от 80 до 100 К, нижние — при температуре жидкого гелия

из чего можно заключить, что вакуум в геттере был порядка 10^{-5} Па. В ходе этого сеанса для контроля работы насоса масс-спектрометр не использовался, он был заменен на датчик давления IKR 060. Масс-спектрометр незаменим для качественного отслеживания ситуации и сравнения работы насосов. Однако анализатор увеличивает давление и изменяет состав газа. Достаточно сказать, что всегда при включении анализатора на посту, где совместно с ним работал вакуумный датчик, давление увеличивалось в несколько раз. Поэтому более точным инструментом отслеживания ситуации при работе с водородом является датчик с холодным катодом.

Предлагаемые далее зависимости давления от времени (рис. 11) получены во время активации геттерного насоса: верхние кривые — при температуре стенок камеры от 80 до 100 К, нижние — при сверхпроводимости.

Нагрев геттера приводит к выделению из него водорода. До завершения захлаживания ускорителя водород свободно распространяется по камере и удаляется турбинами. При гелиевых температурах водород «высаживается» на стенках камеры только возле поста, а до ближайшего к нему поста 8Д4 уже не доходит. Оба варианта активации вполне допустимы. При разогреве камеры вихревыми токами водород вернется обратно на геттер. Однако нам достаточно активации при температурах, близких к началу конденсации водорода.

В предыдущих сеансах, до установки геттерного насоса, показания датчиков на 8Д4 и 8Д3 при работе турбомолекулярных насосов мало отличались друг от друга. Существенное различие появилось только при работе геттера на 8Д3 с датчиком IKR 060. Здесь мы обнаруживаем, что при отсечении турбомолекулярного насоса на посту 8Д3 и работе с одним геттером давление снижается в три раза и становится значительно меньше, чем на посту 8Д4 при работающей там турбине (рис. 12). Далее это соотношение сохраняется

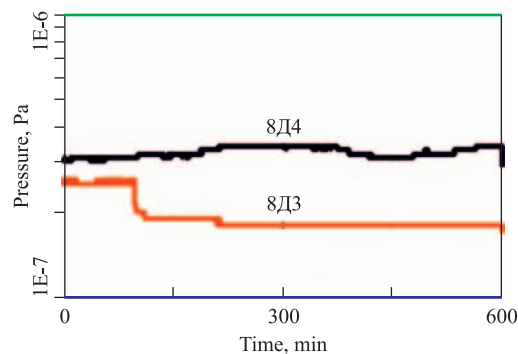


Рис. 12. Динамика изменения давления остаточного газа на постах откачки 8Д3 и 8Д4 при отсечении шибера турбомолекулярного насоса на посту 8Д3

в пользу геттера вплоть до давления $1 \cdot 10^{-6}$ Па! Как говорят в таких случаях, комментарии излишни.

В течение всего сеанса откачка на посту 8Д3 осуществлялась только геттерным насосом, который прекрасно справлялся со своими обязанностями. Для иллюстрации этого достаточно привести две зависимости (рис. 13). На верхней из них (для 8Д4) до отметки 1060 мин ускоритель 40 ч проработал при цикле магнитного поля с амплитудой 8,8 кГс и при темпе роста поля 6 кГс/с, а затем перешел на цикл с амплитудой 15 кГс и темпом роста поля 3 кГс/с. На нижней (для 8Д3) представлен установившийся режим при работе с циклом магнитного поля с амплитудой 15 кГс и темпом роста поля 3 кГс/с и переход на 12 кГс и 6 кГс/с. Здесь мы видим прекрасную иллюстрацию того факта, что турбомолекулярный насос может конкурировать с геттером только до давления 10^{-5} Па. Далее его скорость откачки уменьшается.

В первых экспериментах геттерные насосы устанавливались на камеру через шибер DN40, что обеспечивало возможность сравнения с другими насосами, но уменьшало эффективную скорость откачки. На самом деле при работе на ускорителе шибер геттерному насосу не нужен, и это выгодно отличает его от других откачных средств.

К началу 46-го сеанса геттерный насос был установлен и на посту 8Д4, причем без шибера (рис. 14).

Вакуумные посты 8Д4 и 8Д3 имеют самую большую водородную нагрузку и по этому показателю сопоставимы только с постами 1Ф3 и 1Д4. Во время 46-го сеанса опробована штатная работа геттерных насосов на ускорителе, когда турбомолекулярные насосы предназначены только для предварительной откачки камеры и после охлаждения не используются. Первый прогрев геттерных насосов был произведен до начала охлаждения ускорителя, и его назначение состояло в обезгаживании элементов конструкции. На этом этапе не требуется активировать геттер, поэтому температуру нагрева можно огра-

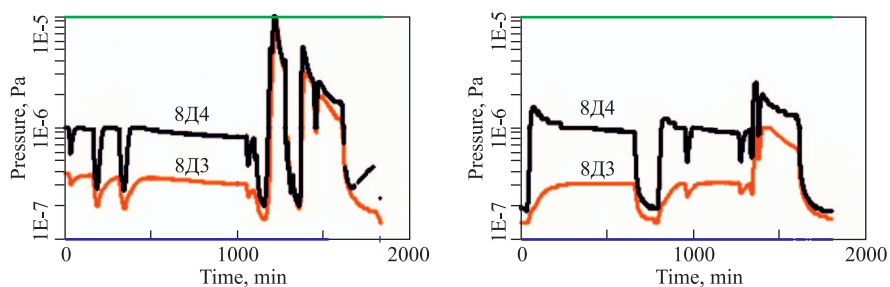


Рис. 13. Динамика изменения давления остаточного газа на постах откачки 8Д3 (откачка производится геттерным насосом) и 8Д4 (откачка производится турбомолекулярным насосом) в ходе сеанса

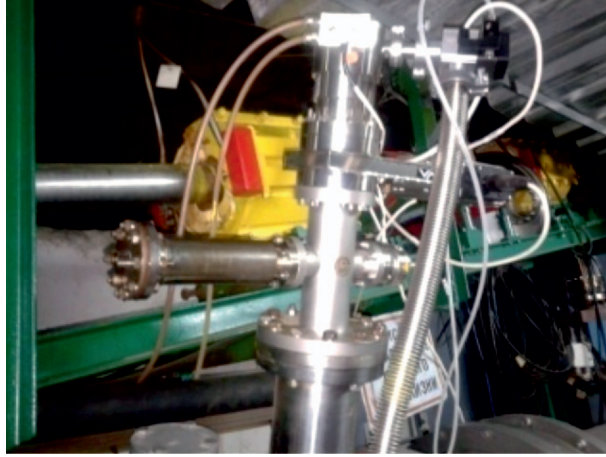


Рис. 14. Геттерный насос на посту откачки 8Д4

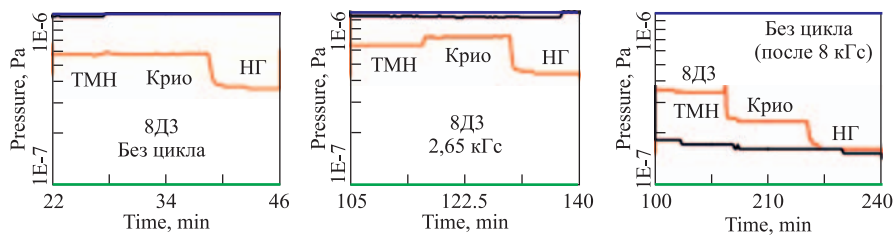


Рис. 15. Эволюция давления остаточного газа на посту откачки 8Д3 при исследованиях эффективности геттерного насоса

ничить 300 °С. В рабочее состояние геттеры приводились в последние сутки охлаждения, при температуре линз, на которых расположены откачные посты, около 30 К. После этого к геттерам во время сеанса не прикасались, они работали самостоятельно. Турбомолекулярные насосы после охлаждения ускорителя отсекаются и могут быть выключены, что сохраняет их ресурс и не требует внимания в случае подсадки напряжения.

Геттерный насос на посту 8Д3 может отсекается от камеры шибером, и это обстоятельство позволило продемонстрировать его эффективность (рис. 15). Все манипуляции проводились по одной схеме: отсекался геттер, и подсоединялся турбомолекулярный насос; после достижения установившегося режима турбина отсекалась, и определялось состояние камеры без дополнительной откачки; затем подсоединялся геттер, и откачка камеры опять переводилась в штатный режим.

Первое изображение (см. рис. 15) снято на четвертые сутки после охлаждения ускорителя. ТМН никак не влияет на вакуум в камере, и его предельное давление примерно $6 \cdot 10^{-7}$ Па. Геттер же, напротив, значительно снижает давление. На следующем изображении при цикле поля с амплитудой 2,65 кГц в камере увеличилось количество водорода, но и здесь преимущество геттера налицо. Третье изображение, как и первое, снято при отсутствии цикла, однако ускоритель уже успел значительное время поработать при цикле поля с амплитудой 8 кГц. Здесь без дополнительной откачки давление значительно ниже, чем в предыдущих случаях. За счет более низкого давления и сравнения с предыдущими изображениями хорошо видно, насколько на самом деле ухудшает вакуум работа ТМН.

Можно отметить, что после длительной работы с циклом магнитного поля амплитудой 15 кГц давление на восьмом и первом суперпериодах четко выходило на минус десятую степень (в торрах). Причем те посты, где шел наибольший поток водорода, после снятия цикла давали более глубокий вакуум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа показала, что геттерный насос может с успехом заменить или дополнить существующие откачные средства. Это значительно повысит надежность и эффективность высоковакуумной системы нуклотрона. На основании полученных результатов в настоящее время удалось отказаться от использования магниторазрядных насосов для откачки пучковой камеры, потому что они капризны в работе и не улучшают вакуум.

Можно предложить локализовать канал инъекции геттерами, установив дополнительные насосы на постах 1Д4 и 1Ф3. Тогда на первом и восьмом суперпериодах можно оставить по одному турбомолекулярному насосу, и то только для тренировки камеры. После достижения гелиевых температур их можно отсечь и остановить. Тогда во время сеанса останутся работающие турбины только вокруг участка медленного вывода: на постах 4Д3, 4Д4, ЭСС, 5Ф3 и 5Д4 — вместо четырнадцати, работающих сейчас.

За помощь в организации работ и за плодотворное обсуждение результатов авторы выражают благодарность А. М. Базанову, Г. Л. Кузнецову, Г. Г. Ходжибагиану.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нестеров А. В.* Высоковакуумный нераспыляемый газопоглотитель // Краткие сообщения ОИЯИ. 1999. № 1[93].
2. *Нестеров А. В.* Некоторые особенности поведения магниторазрядных насосов и нераспыляемых геттеров. Сообщение ОИЯИ Р9-2001-214. Дубна, 2001.

3. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010.
4. *Пустовойт Ю. М., Губанов С. В.* Исследование механизма активирования испаряемых геттеров // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. Гурзуф, 1997. 116 с.
5. *Агапов Н. Н. и др.* Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38). Сообщение ОИЯИ Р9-2009-38. Дубна, 2009.
6. *Кузьмин В. В. и др.* Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011.
8. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 39-го сеанса нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2009-131. Дубна, 2009.

Получено 2 июля 2013 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 23.10.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,54. Тираж 215 экз. Заказ № 58097.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/