

КРИОГЕННЫЙ МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС УСКОРИТЕЛЯ FAIR И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

А. В. Бухаров¹, М. А. Бухарова, Е. В. Вишневский

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Основу мишенного комплекса FAIR–PANDA в настоящее время составляют мишени двух типов: кластерная криогенная мишень и криогенная монодисперсная мишень. Оба типа мишеней в экспериментах с водородом и его изотопами, а также в экспериментах с более тяжелыми газами в состоянии обеспечить в точке взаимодействия с пучком необходимую плотность вещества. Преимуществами криогенной монодисперсной мишени являются: работа и в режиме высокого разрешения (PTR), и в режиме высокой светимости (PHL); отсутствие натекания в камеру взаимодействия; возможность точной реконструкции процесса взаимодействия с пучком. Эти преимущества делают, на наш взгляд, эту мишень более перспективной для физических программ PANDA. В результате работ по исследованию перспектив дальнейшего развития монодисперсных мишеней достигнуты следующие важные результаты: показана возможность создания высокоскоростных монодисперсных мишеней малого диаметра из различных криогенных жидкостей со скоростью ввода мишеней в пучок > 100 м/с; показана возможность создания суперхолодных криогенных монодисперсных мишеней.

The FAIR–PANDA target complex is currently based on two types of targets: a cluster cryogenic target and a cryogenic monodisperse target. Both types of targets in experiments with hydrogen and its isotopes, as well as in experiments with heavier gases, are able to provide the required density of matter at the point of interaction with the beam. The advantages of a cryogenic monodisperse target are the operation in both high resolution (PTR) and high luminosity (PHL) modes, no leakage into the interaction chamber, and the possibility of exact reconstruction of the process of interaction with the beam. These advantages make, in our opinion, this target more promising for the PANDA physics programs. As a result of studies on the prospects for the further development of monodisperse targets, the following important results have been achieved: the possibility of creating high-speed monodisperse targets of small diameter from various cryogenic liquids with a speed of introducing targets into the beam > 100 m/s is shown; the possibility of creating supercold cryogenic monodisperse targets is shown.

PACS: 29.20.–с; 29.90.+г; 07.20.Мс

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс FAIR представляет собой систему ускорителей разных типов и предназначен для исследований элементарных частиц, физики атомного ядра и плазмы, свойств антивещества и материи нейтронных звезд, а также для решения прикладных задач в области материаловедения и медицинских технологий.

¹E-mail: boukharov@mail.ru

Физическая программа экспериментов направлена на поиск новых форм материи. Высокая точность экспериментальных исследований будет достигнута за счет следующих принципиальных достоинств ускорительного комплекса: наличия интенсивного пучка антипротонов с энергией до 15 ГэВ и возможности сканирования по энергии антипротонов с точностью ± 10 кэВ. Это позволит на новом уровне точности исследовать свойства сильного взаимодействия. Завершение строительства планировалось на 2027 г. Инжектором протонных пучков в синхротрон SIS18 будет протонный линейный ускоритель. Оттуда пучки протонов будут направлены в накопитель SIS100. С выхода SIS100 протоны, ускоренные до 29 ГэВ, будут использоваться для производства вторичных антипротонов, которые после охлаждения в кольце Collector Ring (CR) поступят в HESR, где они будут использованы в эксперименте PANDA.

Физическая программа эксперимента PANDA (anti-Proton ANnihilation in DArmstadt) охватывает широкую область исследований — от исследования фундаментальных проблем адронной и ядерной физики до проверки фундаментальных симметрий. Научная программа коллаборации PANDA включает в себя: поиск экзотических частиц, таких как глюболы и гибриды; спектроскопию состояний чармония при энергиях, превышающих энергетический порог образования пар D -анти- D -мезонов; исследования гиперядер (в том числе двойных) и очарованных ядер, в которых странная (одна или две) или очарованная частица замещает собой обычный нуклон. На установке PANDA предполагается также изучать редкие распады, содержащие одиночные фотоны, π^0 - и η -мезоны в широком диапазоне энергий [1, 2].

Предполагается, что при эффективной толщине внутренней мишени (по водороду) $4 \cdot 10^{15}$ атомов на 1 см^2 и эмиттансе пучка $0,3 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ эксперименты PANDA будут проводиться в двух режимах: режиме высокой светимости $2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (PHL) и режиме высокого разрешения $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (PTR).

1. КРИОГЕННЫЙ МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС FAIR–PANDA

Основу мишенного комплекса FAIR–PANDA составляют мишени двух типов: кластерная и криогенная монодисперсная мишень (Cluster Target) и криогенная корпускулярная мишень (Pellet Target) [1, 3].

1.1. Кластерная мишень для PANDA. Работа кластерной мишени основана на адиабатическом охлаждении газа с помощью сверхзвуковых сопел Лавала микронного размера. При попадании газа через сопло в вакуум газ охлаждается и образует сверхзвуковой поток, в котором из-за резкого падения температуры происходит конденсация с образованием наночастиц, так называемых кластеров. Размер кластеров и их плотность зависят от выходного диаметра сопла, формы сверхзвуковой части сопла, давления и температуры газа перед входом в сопло.

На основе исследований по разработке и оптимизации высокоинтенсивных кластерных потоков Мюнстерским университетом (University Münster) для PANDA создан прототип кластерной мишени [4, 5]. Для предварительного охлаждения рабочего газа и сопла до криогенных температур используется двухступенчатая охлаждающая головка (типа MD10, Oerlikon-Leybold) с высокой охлаждающей способностью в сочетании с умеренной вибрацией. В отличие от обычных охлаждающих головок выбранный тип обладает следующими важными особенностями: высокой охлаждающей

щей способностью, большими интервалами технического обслуживания, простотой эксплуатации.

Благодаря высокой охлаждающей способности головка способна охлаждать сопло, а также газ до температуры ниже 20 К. В медный держатель сопла встроен нагревательный элемент и датчик температуры. Стабилизация температуры сопла с точностью $< 0,1$ К осуществляется изменением напряжения, подаваемого на нагревательный элемент с выхода специального блока управления. Стабилизация температуры сопла и дополнительная стабилизация давления газа на входе в сопло гарантируют стабильность толщины мишени в течение всего времени эксперимента.

При попадании газа через сопло в первую вакуумную камеру газ охлаждается и образует сверхзвуковой газовый поток с кластерами. Эта вакуумная камера отделена от следующей вакуумной камеры с помощью скиммера. Кластерный поток, окруженный сверхзвуковой газовой струей, направляется на скиммер для уменьшения газового натекания и отделения газового луча от кластеров. Минимальное давление в первой камере 10^{-1} мбар достигается с помощью одного пластинчато-роторного насоса со скоростью откачки до 9800 м³/ч. Для окончательного снижения фона остаточного газа кластерный поток проходит последовательно несколько вакуумных камер со скиммерами. Диаметр отверстия скиммера — менее $d = 1$ мм. Каждая камера откачивается двумя турбомолекулярными насосами. В результате в последней рабочей камере в точке взаимодействия с пучком удается получить давление меньше 10^{-5} мбар. Для включения или выключения кластерного потока в камере между соплом и первым скиммером установлена специальная заслонка. Сопло и скиммеры установлены на подвижных столах и могут перемещаться в режиме онлайн для согласования друг с другом с точностью до микрометра.

Одним из преимуществ мишени с кластерной струей является однородное распределение плотности мишени. Это преимущество имеет большое значение, поскольку любое значительное изменение плотности мишени привело бы к соответствующему изменению в яркости. Кроме того, абсолютную плотность мишени и, следовательно, светимость можно изменять во время работы на несколько порядков за счет изменения давления газа на входе в сопло и температуры сопла, что позволяет увеличивать плотность во время циклов ускорителя, чтобы компенсировать потери антипротонного пучка и обеспечить постоянную частоту регистрации событий.

К недостаткам можно отнести: большое натекание в камеру взаимодействия с пучком; наличие остаточного газа, окружающего кластерный поток, и некоторое влияние вибрации охлаждающей головки на плотность мишени. Кроме того, мишень можно использовать только в режиме высокой светимости $2 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (PHL).

1.2. Корпускулярная мишень для PANDA. На основании работ по исследованию теплофизических проблем получения монодисперсных потоков для PANDA создан прототип криогенной монодисперсной мишени. Прототип создан в результате совместной работы МЭИ, ИТЭФ и FZJ (Юлих). Работы были поддержаны грантами: проекта МНТЦ № 1966, INTAS 06-1000012-8787, РФФИ 07-08-00747а, DFG-РФФИ 08-08-91950-ННИОа, DFG-РФФИ 09-08-91331-ННИОа.

Теоретической основой получения монодисперсных криогенных мишеней является теория Рэля–Вебера [6]. В общем виде криогенные монодисперсные мишени представляют собой поток твердых монодисперсных гранул (мишеней) диаметром от 10 до 100 мкм со скоростью до 100 м/с и частотой появления до 500 кГц из водо-

рода, его изотопов или других криогенных газов. Относительный разброс мишеней по скорости и размеру не превышает 0,1%. Подробное описание принципа работы установок по получению криогенных монодисперсных мишеней приведено в работах [7–9]. Струя жидкого криоагента вытекает из генератора монодисперсных капель в первую вакуумную камеру — камеру тройной точки — и под действием специального возмущения распадается на поток монодисперсных капель. Затем через тонкие капилляры — шлюзы — поток капель последовательно проходит еще две вакуумные камеры. Так как давление в этих камерах ниже давления над поверхностью капель, происходит интенсивное поверхностное испарение жидкости. В результате капли охлаждаются, становятся твердыми гранулами и поступают в рабочую камеру ускорителя. После взаимодействия с пучком остатки мишеней попадают в охлаждаемую ловушку и осаждаются на ее стенках. Для уменьшения натекания газа в рабочую камеру и увеличения скорости гранул используются несколько камер с низким давлением, разделенных между собой тонкими капиллярами (шлюзами) диаметром 100 мкм. В результате в последней рабочей камере в точке взаимодействия с пучком удается получить давление меньше 10^{-6} мбар.

В отличие от кластерной мишени для охлаждения рабочего газа до криогенных температур используется не охлаждающая головка, а двухванная система ожижения. Такой метод охлаждения оказывает минимальное шумовое воздействие на процесс получения мишеней, что позволяет получать монодисперсные мишени с минимальным, по сравнению с другими способами ожижения, разбросом по скорости и размеру. Подробное описание схемы представлено в патентах [10, 11] и в работах [12–14].

В состав прототипа криогенной монодисперсной мишени, работающей по двухванной схеме, входят следующие элементы и системы: криостат, вакуумные пролетные камеры, ловушка гранул, вакуумная система, система подачи охлаждаемого вещества, система обеспечения жидким криоагентом внутренней ванны, система обеспечения жидким криоагентом внешней ванны, системы генерации монодисперсных капель и измерительная система.

Диаметр, скорость и частота появления в камере рассеивания монодисперсных гранул зависят от выходного диаметра сопла генератора капель, а также от давления и температуры газа на входе в генератор капель. Подавая в генератор капель газ с разным давлением и температурой, можно получать криогенные мишени различных типов: цилиндрические толстые мишени длиной до 10 см и диаметром от 40 до 300 мкм; тонкие волокна длиной от 5 до 10 см и диаметром от 30 до 40 мкм; монодисперсные криогенные мишени. Примеры различных типов мишеней представлены на рис. 1.

Для контроля процесса получения монодисперсных гранул и для обеспечения возможности реконструкции вершин на субмиллиметровом уровне разработана специальная оптическая система слежения за гранулами, основанная на обработке в режиме онлайн видеоизображений от цифровых камер.

Главными преимуществами криогенной монодисперсной мишени являются: отсутствие натекания в камеру взаимодействия, возможность точной реконструкции процесса взаимодействия с пучком, возможность полной синхронизации момента пролета гранулы через пучок с моментом включения датчиков.

Кроме того, в зависимости от экспериментальных требований, в отличие от кластерной мишени, возможны два различных режима работы монодисперсной мишени.

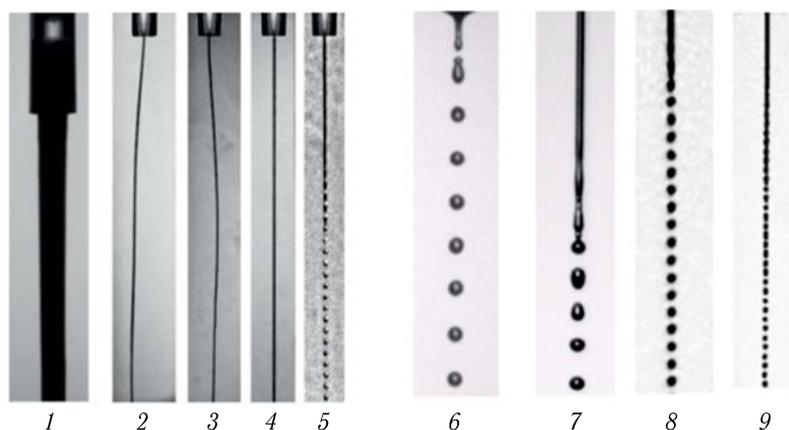


Рис. 1. Криогенные мишени различных типов: 1 — цилиндрическая толстая мишень; 2, 3 — тонкие неустойчивые волокна; 4 — тонкие устойчивые волокна; 5–9 — монодисперсные криогенные мишени

В режиме высокого разрешения (PTR) в пучке ускорителя всегда находится только одна гранула диаметром ~ 20 мкм, что позволяет с большой точностью реконструировать точку начального взаимодействия. В режиме высокой светимости гранул (PHL) в пучке ускорителя находятся несколько гранул диаметром < 10 мкм, что обеспечивает высокую толщину мишени, равномерную во времени. Такой подход позволяет получить для этого режима светимость в пучке ускорителя $\sim 2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что на порядок выше, чем у кластерной мишени.

1.3. Система обеспечения жидкими криоагентами. Система обеспечения жидкими криоагентами PANDA — общая для всех видов криогенных мишеней. Система является модульной и может, за счет увеличения количества модулей, использоваться как для уже существующих мишеней, так и для перспективных. В случае Cluster Target используется модуль, предназначенный для обеспечения охлаждения внутренних и внешних конструктивных частей мишени. В случае Pellet Target кроме модуля охлаждения конструктивных элементов используется дополнительный модуль охлаждения рабочего газа для его последующей конденсации. Далее рассмотрим более подробно состав и работу модуля охлаждения применительно к получению монодисперсных гранул водорода.

В соответствии с методом двухваннового охлаждения в состав модуля входят: система обеспечения жидким криоагентом внутренней ванны (1) и система обеспечения жидким криоагентом внешней ванны (2). Состав систем, их внешний вид и взаимодействие с элементами криостата и друг с другом представлены на рис. 2 и 3.

В состав системы обеспечения жидким криоагентом внутренней ванны 1 (см. рис. 2) входят: транспортный сосуд для хранения жидкого криоагента внутренней ванны; гибкий криопровод; ручные и электромагнитные криогенные клапаны; датчик уровня криоагента в ванне с блоком измерения фирмы Messer; нагреватель для увеличения давления паров в ванне 1а; блок стабилизации давления паров внутри ванны и блок стабилизации расхода паров криоагента 1б.

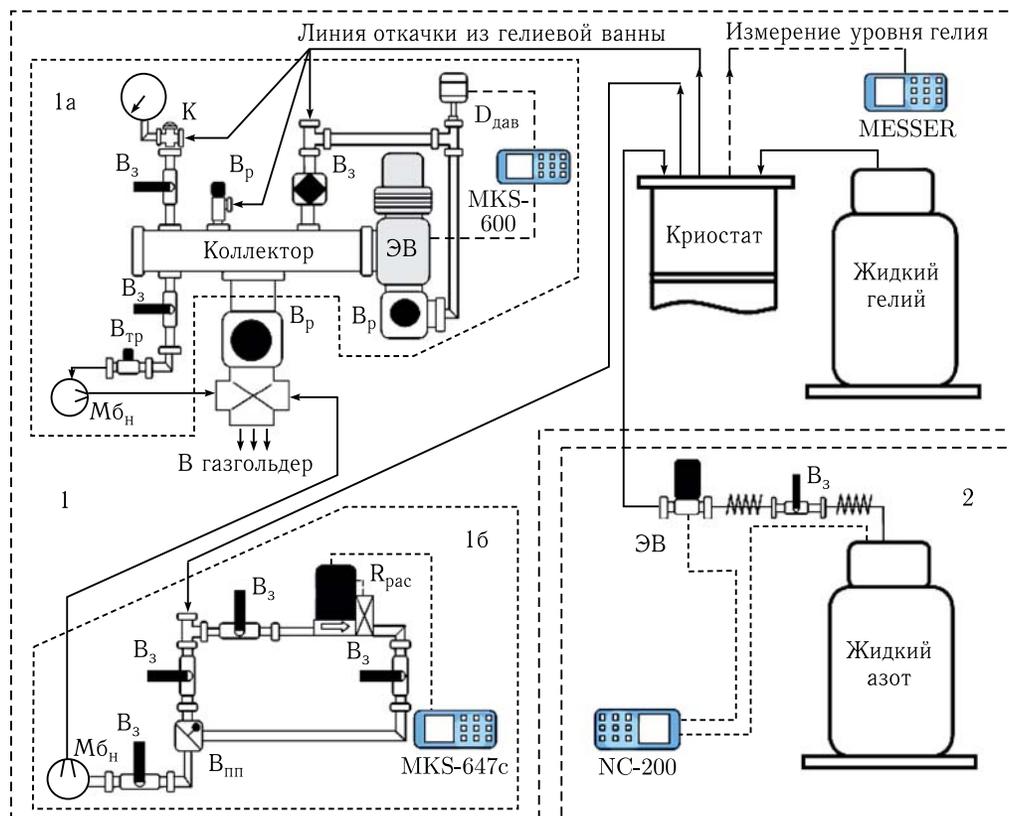


Рис. 2. Система обеспечения жидким криоагентом внутренней ванны 1 и система обеспечения жидким криоагентом внешней ванны 2: $V_з$ — вентиль запорный; $V_п$ — вентиль переключения потоков; $V_р$ — вентиль регулировочный; $V_тр$ — вентиль тонкой регулировки; K — предохранительный клапан; $Mбн$ — мембранный насос; ЭВ — управляемый электрический клапан; $D_{дав}$ — датчик давления; $R_{рас}$ — регулятор расхода

Ожижение охлаждаемого вещества осуществляется парами охлаждающего вещества из внутренней ванны, проходящими через внутренние теплообменники и конденсатор. Для получения устойчивого распада жидкой струи охлаждаемого вещества на капли необходимо, чтобы и давление пара внутри ванны, и расход пара через теплообменники были постоянными. Для поддержания постоянного давления пара внутри ванны используется блок стабилизации давления 1а. В состав блока входят следующие элементы: несколько трубопроводов, коллектор, электромагнитные клапаны, датчик давления $D_{дав}$, клапан с переменным сечением ЭВ, управляемый MKS-600 фирмы MKS Instruments и мембранный насос. С помощью мембранного насоса осуществляется непрерывная дополнительная откачка ванны. При повышении давления в ванне блок управления MKS-600 приоткрывает заслонку в клапане ЭВ. Проходное отверстие клапана увеличивается, и избыток паров откачивается в газгольдер.

В состав блока стабилизации расхода 1б входят следующие элементы: электромагнитные клапаны, регулятор расхода $R_{рас}$ с блоком управления MKS-647 и мембранный

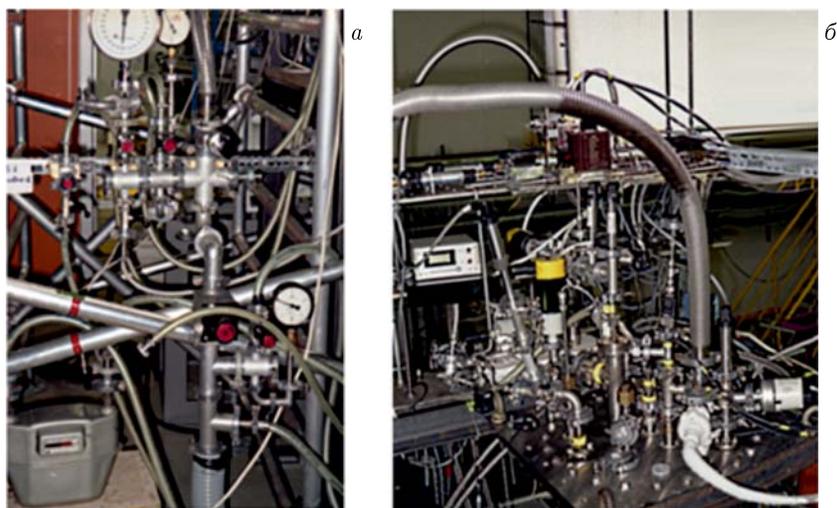


Рис. 3. Внешний вид системы обеспечения жидким криоагентом внутренней ванны (а) и системы обеспечения жидким криоагентом внешней ванны (б)

насос. Управление работой всех электромагнитных клапанов подсистемы осуществляется по командам от компьютера измерительной системы.

С помощью насоса осуществляется непрерывное течение пара из ванны через все внутренние теплообменники. При изменении расхода блок управления MKS-647 изменяет проходное сечение MKS-1259, тем самым обеспечивая постоянство расхода паров через теплообменники. Погрешность измерения и регулирования расхода газа составляет 0,5%. Необходимое для работы значение давления пара внутри ванны и его расход устанавливаются по командам от компьютера измерительной системы.

В состав подсистемы обеспечения жидким криоагентом внешней ванны и ловушки 2 входят: транспортный сосуд для хранения жидкого криоагента; гибкий трубопровод; автоматические криогенные клапаны; датчик уровня криоагента во внешней ванне и датчик в ловушке с блоками измерения NC-200. Управление работой всех электромагнитных клапанов подсистемы осуществляется по командам от компьютера измерительной системы.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИШЕННОГО КОМПЛЕКСА

Основу мишенного комплекса FAIR-PANDA в настоящее время составляют мишени двух типов: кластерная криогенная мишень и криогенная монодисперсная мишень. Оба типа мишеней в экспериментах с водородом и его изотопами, а также в экспериментах с более тяжелыми газами в состоянии обеспечить в точке взаимодействия с пучком необходимую плотность вещества. Преимуществами криогенной монодисперсной мишени являются: работа и в режиме высокого разрешения (PTR) и в режиме высокой светимости (PHL); отсутствие натекания в камеру взаимодействия; возможность точной реконструкции процесса взаимодействия с пучком. Эти преимущества

делают, на наш взгляд, эту мишень более перспективной для физических программ PANDA.

В результате работ в МЭИ [15–17] по исследованию перспектив дальнейшего развития монодисперсных криогенных мишеней, основанных на теории Рэлея–Вебера, достигнуты следующие важные результаты:

— показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней. В соответствии с расчетами при вводе тонких жидких криогенных струй со скоростью, большей 100 м/с, в вакуум струи не успевают замерзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счет испарения охлаждаются и становятся гранулами. Высокоскоростные криогенные монодисперсные мишени обладают следующими преимуществами: непосредственный ввод в вакуум (нет необходимости в камере тройной точки и шлюзах), использование уже имеющегося оборудования Pellet Target, возможность получать мишени с диаметром $D < 20$ мкм из различных криогенных жидкостей с дисперсией, меньшей 1%, точная синхронизация момента взаимодействия гранул с моментом включения датчиков;

— показана принципиальная возможность создания суперхолодных криогенных монодисперсных мишеней. Мишени с температурой от 1 до 4 К можно получить в результате взаимодействия основного потока мишеней с дополнительным капельным потоком жидкого гелия. Мишени с температурой 0,2 К и ниже получают в два этапа. Сначала получают твердые криогенные гранулы. Затем гранулы дополнительно охлаждаются в ванне с раствором гелия-3 в гелии-4. Суперхолодные криогенные монодисперсные мишени обладают следующими преимуществами: отсутствуют тепловые колебания атомов мишени, можно использовать уже имеющееся оборудование Pellet Target, возможно получать мишени с диаметром $D < 10$ мкм из различных криогенных жидкостей с дисперсией, меньшей 1%, точной синхронизацией момента попадания гранулы в пучок с моментом включения датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортв В. Е., Шарков Б. Ю., Штокер Х. Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики — Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR // УФН. 2012. Т. 182, № 6. С. 621–644.
2. Vasiliev A. N., Boukharov A. V., Morozov D. A. et al. Search for New Forms of Matter in Antimatter–Matter Interactions in the PANDA Experiment // At. Energy. 2012. V. 112, No. 2. P. 129–138.
3. Panda Collab. The Cluster-Jet Target and Development for the Pellet Target. PANDA — Target TDR. 2012.
4. Khoukaz A. Internal Targets for the PANDA Experiment // Proc. of STOR11 Conf. 2012; doi: <https://doi.org/10.22323/1.150.0036>.
5. Köhler E., Bonaventura D., Hergemöller A. K. et al. Design and Performance of the Future Cluster-Jet Target for PANDA at FAIR // Proc. of STOR11 Conf. 2012; doi: <https://doi.org/10.22323/1.150.0063>.
6. Rayleigh Lord. On the Instability of a Cylinder of Viscous Liquid under Capillary Force // Phil. Mag. 1892. V. 34. P. 145–154.
7. Trostell B. Vacuum Injection of Hydrogen Micro-Sphere Beams // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 362. P. 41–52.

8. Бухаров А. В., Гиневский А. Ф., Чернышев В. П. и др. Криогенные корпускулярные мишени. Концепция и основная модель. Препринт № 17-17. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 35.
9. Boukharov A., Büscher M., Balanutsa V. et al. Dynamics of Cryogenic Jets: Non-Rayleigh Breakup and Onset of Nonaxisymmetric Motions // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 174505-1–174505-3.
10. Пат. 2298890 Российская Федерация, МПК Н 05 Н 3/00. Способ получения криогенной корпускулярной мишени и устройство для его осуществления / Бухаров А. В., Чернышев В. П., Чернецкий В. Д., Бюшер М. № 2005132792; опубли. 10.05.07. Бюл. № 13. 6 с.
11. German Patent Application No. 10 2007017 212.7-13. Worldwide PCT Application PCT/DE2008/000557. Verfahren und Vorrichtung zur Kuehlung eines Gases / Boukharov A. V., Büscher M.
12. Бухаров А. В., Гиневский А. Ф., Чернышев В. П. и др. Криогенные корпускулярные мишени. Генерация гранул водорода: расчет основных конструктивных элементов, экспериментальный стенд, тесты. Препринт ИТЭФ 9-05. М.: Изд-во ИТЭФ, 2005. С. 30.
13. Boukharov A., Buescher M. et al. // Ann. Report 2008 (Highlights). Inst. Kernphysik, Berichte des Forschungszentrums Jülich. Jül-4282. 2009. P. 33.
14. Boukharov A. V., Ametistov E. V., Ginevsky A. F., Bukharova M. A. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets // Probl. At. Sci. Tech. Ser. Nucl. Phys. Res. 2013. No. 6. P. 205–208.
15. Бухаров А. В., Бюшер М., Герасимов А. С., Гиневский А. Ф. Использование криогенной корпускулярной мишени для экспериментов по лазерному ускорению заряженных частиц // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Ядерно-физ. исслед.» 2010. № 2. С. 60–63.
16. Boukharov A., Vishnevskii E. High Speed Cryogenic Monodisperse Targets for High Intensity Cyclic and Linear Accelerators // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 532–534.
17. Ankudinov V. B., Boukharov A. V., Ogorodnikov V. P., Marukhin Y. A. New Type of Metal Targets // Probl. At. Sci. Tech. Ser. Nucl. Phys. Res. 2014. No. 3. P. 190–192.

Получено 18 ноября 2022 г.