

УДК 539.1.07

**ПРОТОТИП КРИОГЕННОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ВОДОРОДНОЙ
МИШЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА PANDA**

© 2024 г. П. В. Федорец^{а, *}, В. Д. Чернецкий^а, П. В. Балануца^а, А. С. Герасимов^а,
А. А. Голубев^а, Л. Н. Гусев^а, А. Г. Долголенко^а, А. В. Канцырев^а,
В. И. Карасев^а, Н. М. Кристи^а, Е. М. Ладыгина^а, С. А. Макагонов^а,
В. А. Панюшкин^а, А. Н. Панюшкина^а, И. А. Тарасенко^а, А. Б. Халявин^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: pavelfedo933@gmail.com

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

После доработки 23.06.2023 г.

Принята к публикации 14.08.2023 г.

Регулярный монодисперсный поток сферических микромишеней твердого водорода или дейтерия с варьируемым диаметром в несколько десятков мкм и частотой от нескольких десятков до нескольких сотен кГц востребован в качестве внутренних мишеней в физических экспериментах на ускорителях. Статья посвящена модификации и запуску прототипа криогенной корпускулярной водородной мишени, в которой происходит трансформация поступающего в установку газа в поток сферических микромишеней. В мишени реализуются процессы криогенного охлаждения и ожигения газа, формирования жидкой микроструи и управляемого монодисперсного разбиения ее на капли одинакового размера с последующим замораживанием капель и образованием микромишеней при инъекции в вакуум. Прототип мишени включает криогенную, вакуумную и газовую системы, а также системы контроля и оптической диагностики параметров микромишеней. Модифицированный прототип мишени обеспечил стабильные монодисперсные режимы генерации микромишеней диаметром 20–50 мкм при частоте генерации 260–465 кГц.

DOI: 10.31857/S0032816224020268 EDN: QRCDWR

1. ВВЕДЕНИЕ

Криогенная корпускулярная водородная мишень предназначена для применения в научных экспериментах на ускорителях и лазерных установках. В эксперименте PANDA (Proton ANihilation in DArmstadt) [1–3] проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) планируется использовать внутренние мишени на основе изотопов водорода и ряда других газов. В эксперименте PANDA предполагается проведение уникальных исследований на антипротонном пучке накопительного кольца HESR (High Energy Storage Ring). Физическая программа эксперимента направлена на исследование фундаментальных проблем адронной и ядерной физики во взаимодействиях антипротонов с нуклонами и ядрами, нахождение новых экстремальных

форм материи, таких, например, как предсказываемые теорией экзотические адроны: глюболы и гибриды. Поиск новых форм материи и спектроскопия очарованных адронов в эксперименте PANDA станет дополнением к исследованиям, проводимым при ультравысоких энергиях на большом адронном коллайдере в CERN.

Для формирования широкого диапазона светимости в эксперименте PANDA планируется использовать два типа внутренних мишеней: кластерную мишень [4, 5] и криогенную корпускулярную мишень [5, 6], в которой обеспечивается монодисперсный режим генерации потока твердых сферических микромишеней диаметром 15–30 мкм с диапазоном частот от 10 до 400 кГц.

В криогенной корпускулярной водородной мишени обеспечивается непрерывность

и регулярность возобновления микромишеней в точке взаимодействия с пучком антипротонов. При этом отсутствуют твердые осколки взаимодействия пучка антипротонов с мишенью. Отработавшие или неиспользованные микромишени удаляются из зоны взаимодействия через выводной вакуумный тракт. Размеры, частота и скорость микромишеней изменяемы согласно условиям конкретного эксперимента. Наиболее востребованными в эксперименте PANDA являются микромишени из водорода. Реализуема генерация микромишеней из ряда других газов, таких как N_2 , Ar, D_2 , Xe, Ne, Kr. Мишени на основе газов N_2 , Ar, Xe необходимы при измерении абсолютного сечения рождения J/ψ на серии различных ядер от легких до тяжелых. При помощи дополнительной системы трекинга [5] движения микромишеней возможно восстановление траектории каждой микромишени с последующим восстановлением времени и координаты точки взаимодействия с антипротонным пучком, что позволяет существенно подавлять уровень шумов от случайных взаимодействий при последующей обработке экспериментальных данных. Для экспериментов, требующих повышенной эффективной плотности мишени, используется режим высокой светимости без трекинга с большей частотой следования микромишеней.

Эффективная плотность мишени для условий эксперимента PANDA должна составлять не более $2 \cdot 10^{15}$ ат./см² в режиме трекинга микромишеней (микромишени с диаметрами более 20 мкм и частотой формирования около 15 кГц) и не менее $4 \cdot 10^{15}$ ат./см² в режиме высокой светимости (микромишени с диаметрами менее 15 мкм и частотой формирования более 150 кГц). (Эффективная плотность мишени [ат./см²] – это число атомов мишени на единицу площади. При этом атомы мишени условно спроецированы и распределены по всей поперечной плоскости пучка ускорителя. Таким образом учитывается различие в диаметрах мишени и пучка ускорителя и учитывается шарообразная форма микромишени.)

Помимо экспериментов на ускорителях, возможно использование данного типа криогенных мишеней в лазер-плазменных экспериментах и для генерации глубокого ультрафиолетового излучения (EUV) с длиной волны около 13.5 нм с использованием мишени из газа Xe для применения в литографии [7–12].

2. КОНСТРУКЦИЯ

Первые работы по созданию мишени для генерирования потока корпускулярных замороженных гранул водорода были проведены в Швеции коллаборацией CELSIUS-WASA [13, 14]. Такая мишень, в которой использовался охладитель (кулер), работающий по замкнутому циклу Мак-Магона, позволила успешно реализовать длительный стационарный режим генерирования потока замороженных гранул водорода. Однако в процессе ее испытаний выявилось, что механические колебания, сопровождающие работу криогенного блока кулера Мак-Магона, снижают устойчивость формируемой жидкой микроструи. В результате при диспергировании жидкой струи методом вынужденного капиллярного распада (ВКРС) степень монодисперсности сформированного потока жидких капель заметно уменьшалась.

Лишенная этого недостатка мишень разомкнутого цикла, в которой в качестве охлаждающей среды использовался жидкий азот и гелий, была разработана и создана в ИТЭФ [15]. Достоинствами, присущими такому методу криостатирования, являются отсутствие воздействующих на формируемую для ВКРС жидкую микрострую внешних механических возмущений, которые сопровождают работу криогенного блока кулера, а также возможность без изменения конструкции криостата генерировать поток твердых микромишеней не только из изотопов жидкого водорода, но и из других криогенных жидкостей (N_2 , Ar). В дальнейшем работы были продолжены в исследовательском центре Юлих (Германия), где была проведена серия испытаний мишени указанного типа [16].

Однако для поддержания стационарного режима генерирования потока монодисперсных микромишеней в течение длительного периода времени при таком методе криостатирования необходимо непрерывно или периодически пополнять из внешних источников используемые жидкий азот и гелий.

На основе анализа результатов проведенных испытаний мишеней обоих упомянутых типов, в НИЦ “Курчатовский институт” спроектирована и произведена модификация прототипа мишени (рис.1), в конструкции которой реализованы достоинства обоих методов криостатирования – обеспечение длительного стационарного режима ВКРС при минимально допустимом

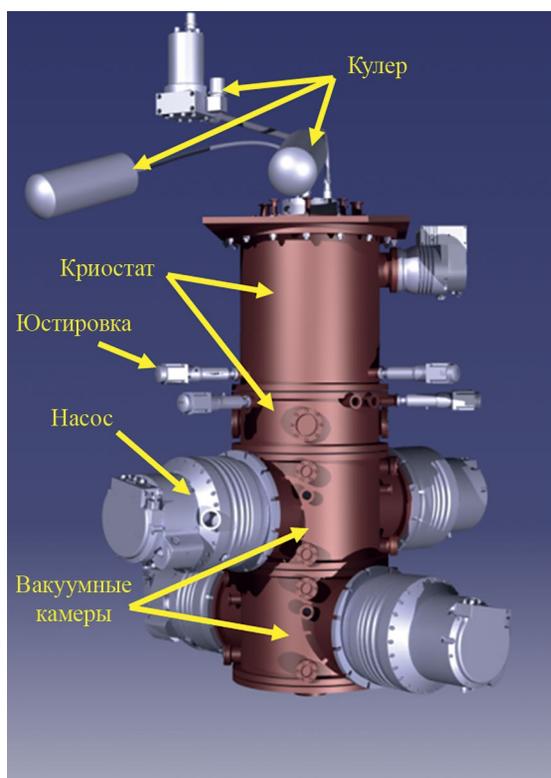


Рис. 1. Рисунок внешнего вида (структуры) мишени (слева) и фотография криостата мишени (справа).

уровне воздействия внешних неконтролируемых механических возмущений на диспергируемую микроструктуру жидкого водорода.

Модифицированный прототип мишени включает в себя вертикальный криостат, в котором последовательно осуществляются все необходимые процессы перевода поступающего извне газообразного водорода в выходящий из криостата монодисперсный поток твердых гранул – микромишеней.

В качестве источника холода – криогенератора в мишени используется кулер замкнутого цикла с пульсационной трубой РТ810. Данный тип кулера, включающего в себя компрессорную станцию и выносной криогенный блок (криогенератор), обеспечивает длительный непрерывный режим криостатирования с холодопроизводительностью второй ступени 14 Вт на температурном уровне 20 К с минимальным уровнем механических вибраций [17, 18].

Схема криостата прототипа мишени представлена на рис. 2. На верхней плите криостата закреплен выносной блок кулера. Первая и вторая ступени кулера расположены внутри верхней части криостата. Узел генерирования микромишеней, включающий в себя конденсатор водорода, камеру формирования монодисперсной струи

(КФМС) и шлюзовое устройство, расположен ниже, в средней секции криостата. Конденсатор вместе с герметично присоединенной к нему КФМС шарнирно подвешен к подвижной платформе юстировочного двухкоординатного столика, нижние концы трех опор которого, в свою очередь, шарнирно закреплены на неподвижной плите.

Три гибких медных хладопровода связывают верхнюю часть корпуса конденсатора со второй, наиболее холодной ступенью криогенератора. К расположенному в нижней части конденсатора выходному штуцеру присоединен сопловой конфузальный насадок с закрепленным кольцевым пьезоэлектрическим преобразователем. На выходе соплового насадка формируется струя жидкого водорода.

В средней части КФМС расположены стеклянные смотровые иллюминаторы для диагностики микромишеней. Шлюз герметично связывает внутреннюю полость КФМС с расположенной ниже первой вакуумной камерой. Шлюз представляет собой цилиндрический металлический корпус с установленным сужающимся стеклянным капилляром. В вакуумных камерах установлено по два турбомолекулярных вакуумных насоса. Насосы обеспечивают последовательное

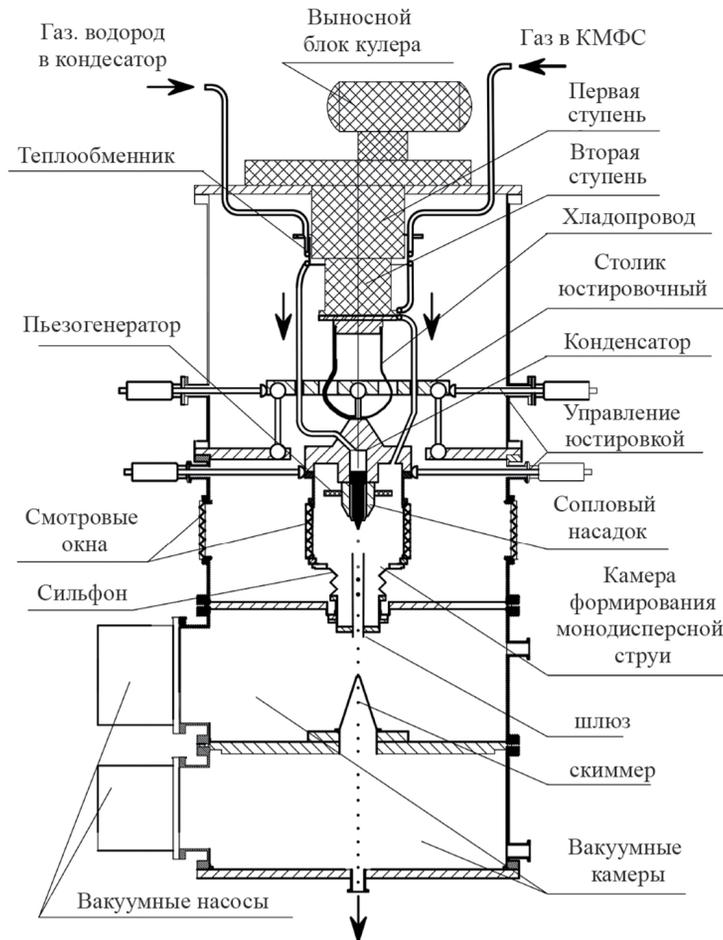


Рис. 2. Схема криостата прототипа криогенной корпускулярной водородной мишени.

по ходу течения потока водорода снижение давления от десятков мбар в КФМС до 10^{-6} мбар во второй выходной камере. На перегородке, разделяющей верхнюю и нижнюю вакуумные камеры, установлен скиммер (коллиматор), ограничивающий угол рассеяния проходящего потока гранул водорода.

Высота криостата вместе с расположенным на его верхнем фланце выносным блоком кулера составляет около двух метров. Наружный диаметр криостата равен 450 мм.

3. ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ МИКРОМИШЕНЕЙ

Предварительное охлаждение до температуры 40–50 К поступающего в криостат потока газообразного водорода осуществляется в канале теплообменника, стенки которого термически связаны с первой ступенью кулера. Дальнейшее охлаждение, ожижение и переохлаждение жидкости на 3–4 К (относительно равновесной поддерживаемому давлению температуре)

осуществляются в конденсаторе. Охлаждение корпуса конденсатора осуществляется второй ступенью кулера с помощью гибких медных хладопроводов. Подобная термическая связь практически исключает передачу механических колебаний от первой ступени кулера к корпусу конденсатора, что минимизирует влияние механических возмущений на процесс диспергирования жидкой микроструи в режиме вынужденного капиллярного распада струи. Через стеклянный конфузорный насадок жидкий водород из конденсатора инжектируется в КФМС в форме жидкой микроструи. В КФМС поддерживается давление, близкое к давлению тройной точки водорода, что облегчает его последующий фазовый переход из жидкого в твердое состояние.

Режим ВКРС реализуется при включении установленного на корпусе конфузорного насадка пьезоэлектрического преобразователя, колебания которого передаются жидкой струе водорода. В результате истекающая из насадка

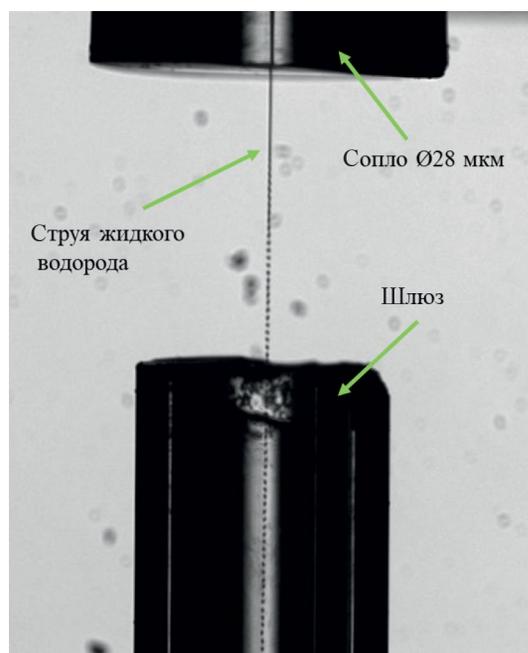


Рис. 3. Тенеграфическое изображение струи водорода и монодисперсного потока капель в режиме ВКРС. Установлен стеклянный конфузорный насадок (сопло) внутренним диаметром 28 мкм и стеклянный шлюз. Частота генерации микромишеней 465 кГц. Экспозиция кадра 900 нс.

непрерывная струя водорода диспергируется, образуя поток монодисперсных капель. Пример тенеграфического изображения истечения жидкой струи водорода из насадка и диспергирования в режиме ВКРС с образованием монодисперсного потока и входа потока в шлюз представлен на рис. 3.

С помощью расположенного внутри криостата юстировочного устройства траектория движения капель водорода в КФМС совмещается с вертикальной осью шлюза.

На рис. 4 представлены фотография камеры формирования микромишеней и шлюза. Наружные размеры КФМС с четырьмя стеклянными иллюминаторами составляют $50 \times 50 \times 50$ мм³. Установленный во входной части шлюза сиффон обеспечивает линейное и угловое перемещение оси КФМС относительно оси шлюза в процессе юстировки.

При движении в шлюзе монодисперсный поток жидких капель разгоняется за счет перепада давления между камерой КФМС и давлением в расположенных ниже вакуумных камерах. За счет происходящего по ходу движения капель понижения давления происходит испарение поверхностного слоя капель и создаются

термические условия для начала перехода водорода в твердое фазовое состояние. Таким образом формируется поток твердых замороженных микромишеней.

В детекторе PANDA выходящий из криостата со скоростью около 60–80 м/с поток твердых гранул водорода через вакуумируемую трубку диаметром в несколько сантиметров будет транспортироваться к точке взаимодействия с пучком антипротонов, расположенной примерно на 2 м ниже выходного штуцера криостата. После взаимодействия микромишеней с пучком продукты взаимодействия или незатронутые микромишени собираются в расположенной в нижней части магнита детектора PANDA охлаждаемой ловушке. Работы по проведению потока микромишеней до точки взаимодействия с антипротонами продолжаются.

В процессе формирования профиля криогенной микроструи важную роль играет геометрия канала истечения. Освоена технология изготовления стеклянных конфузорных насадков с выходными отверстиями от 5 до 50 мкм и с оптимальными углами сужения канала. Изображения профилей нескольких изготовленных насадков с различными диаметрами выходных отверстий каналов истечения показаны на рис. 5.

Помимо криогенной системы, в состав прототипа криогенной корпускулярной водородной мишени входят также необходимые для ее функционирования газовая, вакуумная системы и устройства контроля режимов работы, оптической диагностики и оперативного управления линейными и угловыми координатами истекающей из конденсатора струи.

Газовая система включает в себя емкости со сжатым газообразным водородом, блок тонкой очистки, газовые коммуникации с установленной на них необходимой запорной регулирующей арматурой, контрольно-измерительными устройствами и приборами. Водород из емкости подается в криостат по двум каналам. Поток водорода, поступающий из первого канала, преобразуется в истекающий из криостата монодисперсный поток микромишеней. Поток, поступающий из второго канала, используется для поддержания и стабилизации давления в КФМС. Величина массового расхода или давления каждого потока поддерживается на заданном уровне контроллером MKS (Mass Flow Controllers). Для очистки газообразного водорода используется



Рис. 4. Фотография камеры формирования монодисперсной струи. Вверху — обзорная фотография шлюза и камеры КФМС при снятом корпусе криостата, внизу слева — фотография шлюза, внизу справа — фотография камеры КФМС с установленными окнами.

блок HP-50-VCR с палладиевой мембраной, что позволяет использовать более дешевый газобразный водород (с чистотой класса 5.0).

Вакуумная система прототипа мишени, включает в себя 5 турбомолекулярных насосов, форвакуумную станцию ROOTS и форвакуумные насосы предварительной откачки. Четыре турбомолекулярных насоса Pfeiffer HiPace 2300 установлены по два на боковых стенках каждой вакуумной камеры. Рабочее давление в верхней вакуумной камере поддерживается в диапазоне 10^3 – 10^{-4} мбар, а в нижней 10^{-5} – 10^{-6} мбар. Скиммер между двумя вакуумными камерами, помимо

уменьшения угла разлета микромишеней, служит также для создания перепада давления между двумя вакуумными камерами. Установленный на стенке верхней обечайки криостата турбомолекулярный насос Pfeiffer HiPace 300 поддерживает давление, необходимое для вакуумной теплоизоляции всех низкотемпературных узлов, расположенных внутри криостата.

Для управления и измерения основных параметров работы, а также для поддержания стабильной работы прототипа мишени установка в режиме реального времени используется система диагностики и автоматизации (СДА) [19].

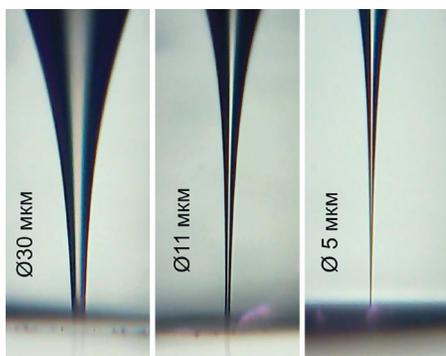


Рис. 5. Увеличенное изображение профиля изготовленных каналов истечения стеклянных конфузорных насадков.

С помощью системы СДА обеспечивается сбор данных о температуре характерных точек внутри установки, контролируется и управляется величина давления на всех этапах прохождения газа и формирования микромишеней, контролируется и управляется величина потока газа, подбирается требуемая резонансная частота ВКРС, осуществляется тонкая регулировка температурного поля проточного канала при помощи системы нагревателей.

Для обеспечения монодисперсного распада струи жидкого водорода на микромишени используется пьезогенератор, представляющий собой кольцо, изготовленное из ЦТС (цирконат-титат свинца), устанавливаемое на крепеж конфузорного насадка. Для питания пьезогенератора выбран генератор синусоидального сигнала Rigol DG4202 с усилителем Tabor EI. 9100.

Контроль процессов формирования и движения микромишеней внутри криостата осуществляется в онлайн-режиме через оптические окна, установленные на корпусе криостата, при помощи нескольких ПЗС камер SDU-285, расположенных под углом в 90° относительно друг друга в горизонтальной плоскости и нескольких уровнях по вертикали.

Из-за высокой скорости движения микромишеней (до 100 м/с после инъекции в вакуум) для формирования тенеграфических изображений микромишеней с минимальным размытием время экспозиции кадров регулируется в диапазоне 100–1000 нс. Экспозиция кадров обеспечивается с помощью короткоимпульсных стробируемых светодиодных LED-излучателей [19]. Важным элементом установки является подсистема юстировки, включающая шарнирный механизм,

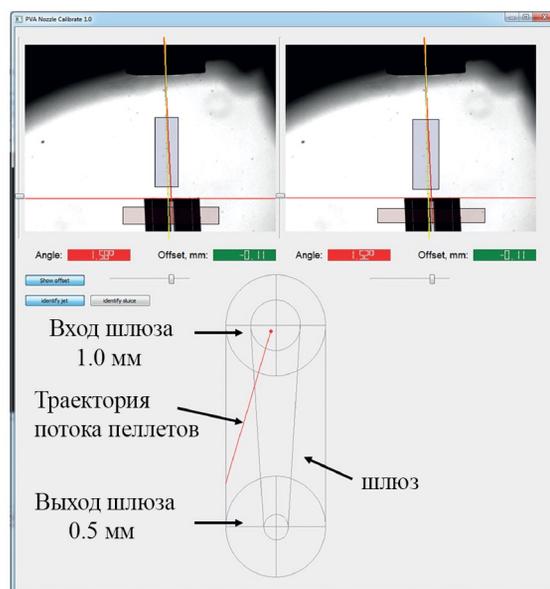


Рис. 6. Главное окно программы Nozzle Calibrate для определения пространственного смещения и углового отклонения соплового устройства и параметров потока микромишеней.

управляемый механическими вакуумными вводами с переходником на шаговые двигатели. Контроль за процессом юстировки реализуется в онлайн-режиме при помощи разработанной на языке Python программы Nozzle Calibrate [20], по данным тенеграфических изображений проводится построение траектории струи, оси выходного шлюза, взаимных углов оси потока микромишеней и шлюза. Пример работы программы Nozzle Calibrate показан на рис. 6.

Для работы мишени в составе системы EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [21, 22], использующейся для управления детектором PANDA, разработан программный транспортный узел (ПТУ), работающий на одноплатном компьютере Raspberry Pi 3. Программный транспортный узел, написанный на языке программирования Python и модуля PyEpics, позволяет двунаправленно через протокол TCP/IP Sockets передавать контрольные параметры и управляющие команды из системы СДА в базу данных системы EPICS.

4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРОТОТИПА МИШЕНИ

Процесс самопроизвольного распада на одинаковые капли маловязкой и сильно недогретой жидкой струи описывается линейной теорией Рэлея [23, 24], в которой при допущении

Таблица 1. Достигнутые режимы генерации водородных капель для комбинаций диаметра конфузорного насадка и частоты генератора

Внутренний диаметр канала конфузорного насадка, мкм	Частота пьезогенератора, кГц	Диаметр струи, мкм	Диаметр капель, мкм	Расстояние между каплями, мкм
21	260	21±2	21±2	38±5
22	360	22±2	28±4	44±5
28	465	28±2	32±3	19±3
33	433	33±2	50±2	24±2

об отсутствии других, кроме капиллярной, видах неустойчивостей устанавливается взаимосвязь между основными параметрами формирующегося дискретного потока. Согласно данной теории, применяемой и при ВКРС, при достижении определенных сочетаний между ключевыми параметрами: диаметром струи, скоростью струи и частотой внешней вибрации, реализуется распад струи на одинаковые капли (монодисперсный распад). Доступный диапазон размеров капель — от нескольких единиц до десятков микрон — определяется внутренним диаметром применяемого конфузорного насадка. В то же время при ВКРС-жидкостей в насыщенном или слабонедогретом состоянии (что характерно, в частности, для H_2) появляются другие виды неустойчивости, при присутствии которых теория Рэлея не отражает взаимосвязи параметров потока, что требует выполнения экспериментального подбора параметров.

В ходе экспериментов для различных диаметров конфузорного насадка при определенных частотах пьезогенератора достигнуты режимы монодисперсного распада водородной струи (табл. 1).

Проведены тесты работы прототипа мишени при длительном (около 16.5 ч, далее тест принудительно остановлен) сохранении устойчивого режима генерации микромишеней.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена модификация прототипа криогенной корпускулярной водородной мишени для генерации замороженных микромишеней диаметром 20–50 мкм при частоте генерации 260–465 кГц. Освоена и отлажена технология производства сопловых конфузорных насадков. Прототип мишени включает криогенную, вакуумную и газовую системы, системы контроля, автоматизации и оптической диагностики параметров микромишеней. На прототипе мишени продемонстрированы устойчивые режимы

(около 16.5 ч непрерывной работы) генерации микромишеней с монодисперсным распадом струи жидкого водорода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов благодарит профессора М. Büscher из Исследовательского центра Юлих, Германия за многолетнее плодотворное сотрудничество и помощь.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwarz C. and the PANDA Collaboration // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 374. P. 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/374/1/012003>
2. PANDA collaboration. // Letter of Intent for: PANDA. 2004. <https://www.panda.gsi.de/>
3. Täschner A., Köhler E., Ortjohann H.-W., Khoukaz A. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2011. V. 660. № 1. P. 22. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.024>
4. PANDA collaboration. // Technical Design Report for the PANDA Internal Targets. 2012. https://fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_exp/PANDA_Targets_TDR.pdf
5. Fedorets P., Chernyshev V., Semenov A., Büscher M., Chernetsky V., Bukharov A. // AIP Conf. Proc. 2006. V. 814. P. 614. <https://doi.org/10.1063/1.2176552>
6. Борисов В.М., Кошелев К.Н., Прокофьев А.В., Хаджийский Ф.Ю., Христофоров О.Б. // Квантовая электроника. 2014. V. 44. № 11. P. 1077.
7. Nakano M., Abe T., Endo A. // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2004. V. 5537. P. 1. <https://doi.org/10.1117/12.555468>
8. Hansson B.A.M., Hemberg O., Hertz H.M., Berglund M., Choi H.-J., Jacobsson B., Janin E., Mosesson S., Rymell L., Thoresen J., Wilner M. // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. № 6. P. 2122. <https://doi.org/10.1063/1.1755441>

10. *Song I., Iwata K., Homma Y., Watanabe M., Kawamura T., Okino A., Horioka K., Hotta E., Mohanty S.R., Yasuoka K.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. V. 44. № 12. P. 8640.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8640>
11. *Suganuma T., Abe T., Komori H., Takabayashi Y., Endo A.* // *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering.* 2004. V. 5662. P. 367.
<https://doi.org/10.1117/12.596356>
12. *Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Y., Nechay A.N., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Toropov M.N., Tsybin N.N., Golubev S.V., Vodopyanov A.V., Yulin S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. P. 221101.
<https://doi.org/10.1063/1.5016471>
13. *Trostell B.* // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 1995. V. 362. P. 41.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00302-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00302-9)
14. *Ekström C., Friden C.-J., Jansson A., Karlsson J., Kullander S., Larsson A., Norman G. and the WASA Collaboration* // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 1996. V. 371. P. 572.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00009-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00009-5)
15. *Afonasyev V., Borgs W., Boukharov A., Büscher M., Gerasimov A., Ginevskiy A., Goryachev V., Gusev L., Dmitriev A., Orlov A., Podchasky S., Semenov A., Tarasenko I., Hohlov V., Chernetsky V., Chernyshov V., Chumakov M.* Preprint ITEP 9-05. Moscow: ITEP, 2005.
16. *Boukharov A.V., Büscher M., Gerasimov A.S., Chernetsky V.D., Fedorets P.V., Maryshev I.N., Semenov A.A., Ginevskii A.F.* // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. P. 174505.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.174505>
17. *Riabzev S., Veprik A., Vilenchik H., Pundak N.* // *Cryogenics.* 2009. V. 49. № 1. P. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2008.08.002>
18. *Wang C., Hartnett J.* // *Cryogenics.* 2010. V.50. № 5. P. 336.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.01.003>
19. *Kantsyrev A.V., Panyushkin V.A., Balanutsa P.V., Bogdanov A.V., Gerasimov A.S., Golubev A.A., Demekhin V.I., Dolgolenko A.G., Kristi N.M., Ladygina E.M., Lushchevskaya E.V., Fedorets P.V., Chernetsky V.D., Paniushkina A.N., Vasiliev V.V., Büscher M.* // *Phys. Atom. Nucl.* 2019. V 82. № 12. P. 1665.
<https://doi.org/10.1134/S1063778819120135>
20. *Панюшкин В.А.* Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ, RU2021669446. 16.11.2021.
21. EPICS Experimental Physics and Industrial Control System. 2021. <http://www.aps.anl.gov/epics/>
22. *Букреева С.И., Гончаренко Ю.М., Семенов П.А.* // *ПТЭ.* 2017. № 2. С. 40.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217020021>
23. *Lord Rayleigh* // *Proc. London Math. Soc.* 1879. V.10. P. 4.
24. *Lord Rayleigh* // *Phil. Mag.* 1892. V. 34. P. 145.