

А. В. Бухаров¹, А. А. Семенов¹, В. П. Чернышев², В. Д. Чернецкий², М. Бюшер³

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)

Институт экспериментальной и теоретической физики, Москва, Россия (2)

Институт ядерной физики исследовательского центра г. Юлих, Германия (3)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ГРАНУЛ ИЗ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты совместной работы ИТЭФ, МЭИ и Института ядерной физики исследовательского центра в г. Юлих (Германия) по созданию корпускулярной мишени. Приведено описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов по получению гранул из жидкого водорода. Работоспособность экспериментальной установки была проверена в тестовых экспериментах по получению монодисперсных гранул из жидкого водорода. Получен долговременный устойчивый распад струи водорода на одинаковые капли и последующим их замерзанием при движении через вакуумные камеры установки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для исследовательских программ, направленных на решение фундаментальных проблем физики элементарных частиц, необходим новый тип внутренней мишени.

Наиболее перспективным типом внутренней мишени является криогенная корпускулярная мишень (проект WASA CELSIUS, Швеция; проект на протонном ускорителе ИТЭФ, проект FZ-Jülich) [1 – 3].

Корпускулярная мишень может быть создана на основе вынужденного капиллярного распада струи жидкого водорода, дейтерия, азота, аргона, криптона и ксенона. Струя жидкого криоагента вытекает из тонкого капилляра (диаметр капилляра порядка нескольких десятков микрон) в камеру с давлением, чуть меньшим давления тройной точки. Под действием специального возмущения, накладываемого на струю, она распадается на одинаковые капли [4]. Капли за счет интенсивного испарения охлаждаются и замерзают. Замёрзшие твёрдые гранулы через систему отверстий (шлюзов) поступают в рабочую камеру ускорителя. Шлюзы обеспечивают минимальное натекание газа в рабочую камеру ускорителя. Для уменьшения натекания можно использовать две и более вакуумных камер, разделенных между собой шлюзами. После взаимодействия с пучком гранулы попадают в охлаждаемую ловушку и выводятся из ускорителя.

Корпускулярная мишень обладает следующими важнейшими свойствами, отличающими её от мишеней других типов: высокая светимость (до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$); возобновляемость мишени; малые размеры (диаметр гранул не превосходит нескольких десятков микрон); стабильность по размерам и траектории движения (разброс по траекториям движения гранул не превосходит долей миллиметра) [5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для изучения теплофизических процессов, влияющих на получение твёрдых гранул из жидкого водорода, была собрана экспериментальная установка. В состав установки входят следующие элементы: криостат с системой ожижения и вакуумными камерами со шлюзами, вакуумная система, система подачи водорода, система обеспечения жидкими криоагентами, ловушка гранул и система метрологии.

Основным элементом экспериментальной установки является криостат с системой ожижения и вакуумными камерами со шлюзами. Расположение основных элементов криостата и взаимодействие их друг с другом представлены на рис. 1. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [6].

Для контроля теплофизических процессов, происходящих внутри криостата, и для визуализации процесса каплеобразования использовалась специальная система метрологии в составе системы измерения давления, системы измерения температуры и системы контроля каплеобразования. Расположение основных элементов системы метрологии и их взаимодействие друг с другом представлены на рис. 1. В системе измерения давления использовались датчики фирмы Balzers следующих типов: APR 260, 1000 мбар, APR 265, 5000 мбар; TPR 260 и PKR. Расположение датчиков давления приведено на рис. 1. В системе измерения температуры использовались специально откалиброванные полупроводниковые датчики TG-120-SD фирмы Lake Shore Cryotronics. Показания датчиков оцифровывались и поступали на ЭВМ. Погрешность измерения давления составляла: для датчиков типа APR — ± 10 мбар, для датчиков типа TPR $\pm 10^{-4}$ мбар и для датчиков типа TPR — $\pm 10^{-8}$ мбар. Погрешность измерения температуры составляла $\pm 0,3$ К.

В системе контроля каплеобразования использовалось следующее оборудование: строботометр СТ-МЭИ и цифровая телекамера PixelFly фирмы Pro.imaging. Строботометр подсвечивал струю и капли короткими световыми импульсами (длительность импульса порядка 1 мкс). Запуск строботометра и цифровой камеры осуществлялся сигналом с частотой, синхронной частоте сигнала, подаваемого на генератор капель. Цифровая телекамера использовалась для фиксации процессов, происходящих при образовании капель.

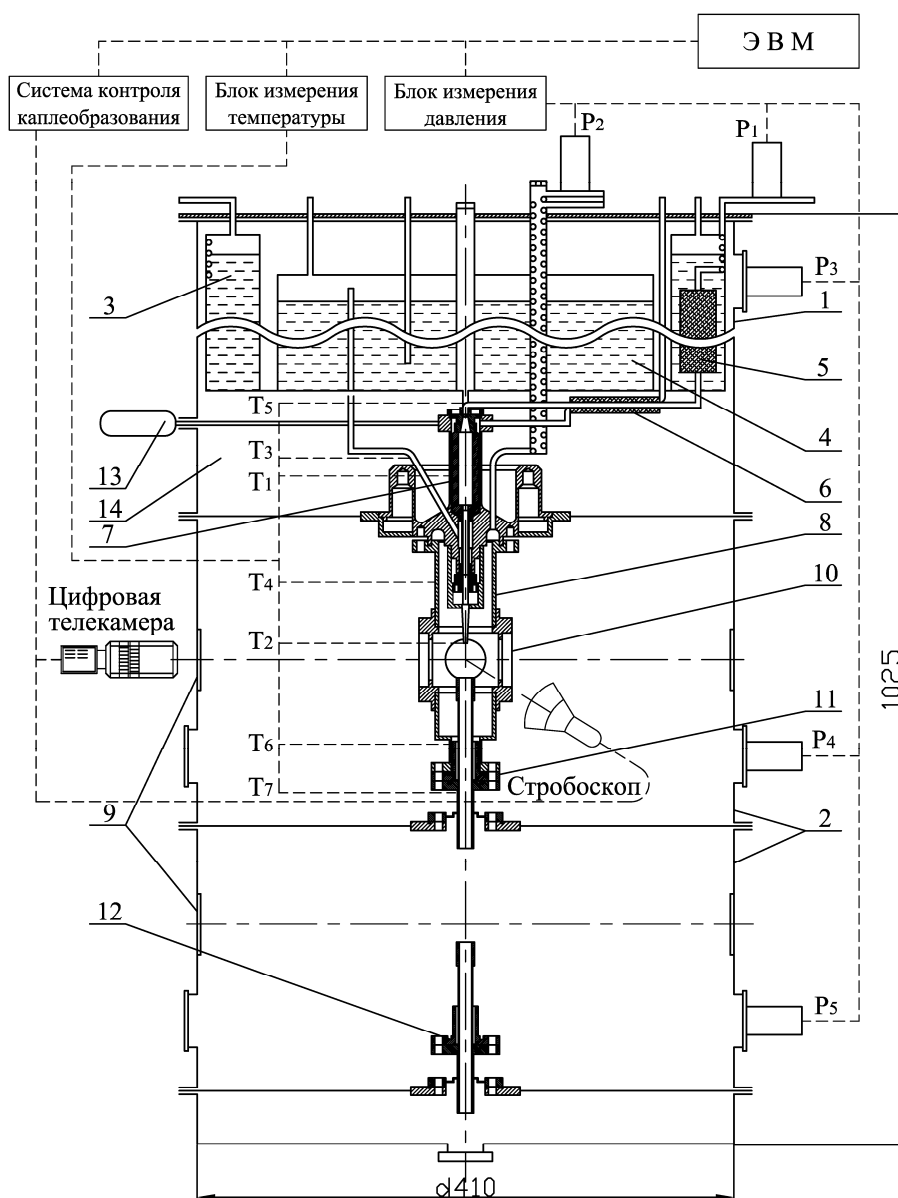


Рис. 1. Расположение основных элементов криостата и системы метрологии:

1 — верхняя обечайка; 2 — вакуумные камеры; 3 — азотная ванна; 4 — гелиевая ванна; 5 — первый предварительный теплообменник; 6 — второй предварительный теплообменник; 7 — конденсатор; 8 — генератор монодисперсных капель; 9 — окна для наблюдения; 10 — камера тройной точки; 11 — первый шлюз; 12 — второй шлюз; 13 — юстировочный узел; 14 — Изолирующий объем. P — датчики давления, T — датчики температуры

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕЖИМОВ РАСПАДА И ПОЛУЧЕНИЮ ГРАНУЛ ИЗ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Работоспособность экспериментальной установки была проверена в тестовых экспериментах по получению монодисперсных гранул из жидкого водорода. Для получения гранул разного диаметра использовались сопла с диаметрами выходных отверстий от 16 до 25 мкм.

Эксперименты проходили следующим образом. Предварительно проводились откачка камер криостата и охлаждение всех его внутренних частей. Откачка проводилась в течение всего эксперимента, но наибольшие изменения давления наблюдались в первые 6 ч. За это время давление в изолирующем объеме падало от атмосферного до

10^{-6} мбар. Давление 10^{-6} мбар в изолирующем объеме обеспечивает наименьшие теплопритоки к теплообменникам системы ожижения водорода. После откачки изолирующего объема до 10^{-6} мбар проводилось заполнение азотной ванны жидким азотом и начиналось охлаждение внутренних частей криостата.

Через 8 ч основные внутренние элементы криостата охлаждались до температуры жидкого азота. После охлаждения гелиевой ванны до температуры жидкого азота она заполнялась жидким гелием. Пары гелия из ванны использовались для окончательного охлаждения внутренних частей криостата и теплообменников системы ожижения. Температура внутри криостата падала, и при охлаждении теплообменников системы ожижения до температуры 70 К в теплообменники и конденсатор пода-

вался водород. Водород, протекая через теплообменники и конденсатор, охлаждался и поступал в генератор каплей. Через сопло генератора капля водорода поступала в камеру тройной точки. При охлаждении генератора до температуры около 20 K начинался процесс ожижения водорода.

Исследование режимов распада струй водорода на капли

Меняя давление на входе в конденсатор можно было получать струи жидкого водорода с различной скоростью истечения и исследовать режимы распада струй на капли.

Для подробного исследования роста волны возмущения использовалась следующая методика. С помощью системы контроля каплеобразования фиксировался процесс распада струи на капли.

Изображение процесса распада оцифровывалось и запоминалось в памяти ЭВМ. С помощью специального программного обеспечения изображение анализировалось и определялась амплитуда волны в разных точках вдоль струи. Полученные значения амплитуд использовались для нахождения уравнения аппроксимационной кривой. В качестве примера на рис. 2 (b) приведена фотография одного из наблюдавшихся режимов распада.

Соответствующие этому режиму значения амплитуды волны возмущения в разных точках вдоль струи и кривая, их аппроксимирующая, приведены на рис. 2 (a). Для сравнения на том же рисунке приведены результаты расчета амплитуды волны возмущения в разных точках струи, полученные по линейной теории Релея [7], и кривая, их аппроксимирующая. Из сравнения кривых видно, что линейная теория Релея не подходит для описания процесса распада струи жидкого водорода на капли.

Эксперименты по получению гранул из жидкого водорода

По результатам исследований режимов распада струй водорода на капли были отобраны наиболее устойчивые режимы. В дальнейшем работа экспериментальной установки проходила именно в этих режимах. Эксперименты по получению твердых гранул водорода проводились со струями диаметром 16 и 25 мкм при разных скоростях истечения.

В соответствии с моделью процессов, проходящих в мишени [5], капли должны замёрзнуть ещё при движении в первом шлюзе. В противном случае прочности жидких водородных капель может не хватить, чтобы избежать адиабатного взрыва при попадании жидкой капли в вакуум.

Результат прохождения капель через первый и второй шлюзы контролировался с помощью цифровой камеры. На рис. 3 (a) приведены фотографии гранул на выходе из первого шлюза, а на рис. 3 (b) приведены фотографии гранул на выходе из второго шлюза.

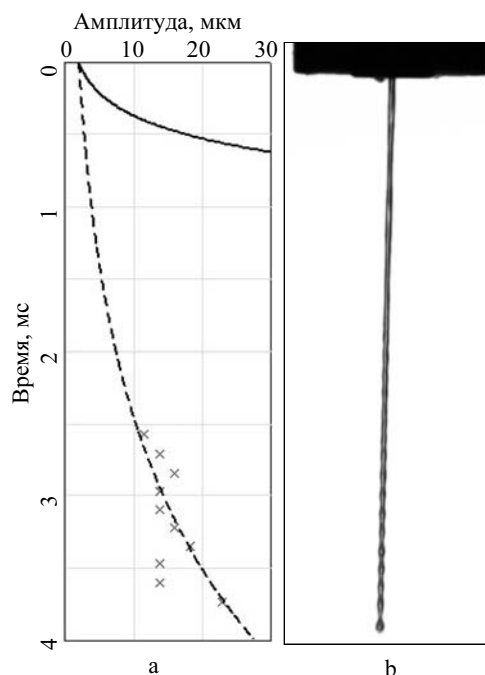


Рис. 2. Рост амплитуды волны возмущения вдоль струи: а – рост амплитуды волны с течением времени; × – экспериментальные точки; ---- аппроксимационная кривая; — — — расчет по линейной теории Релея; б – фотография распада струи на капли

Из рис. 3 (a) видно, что гранулы выходят из первого шлюза под разными углами к вертикальной оси. Поэтому через второй шлюз проходят только те гранулы, траектории которых совпадают с вертикальной осью.

Как показали эксперименты, во вторую вакуумную камеру попадает чуть больше 10% всех гранул. Гранулы, непрошедшие через второй шлюз, упруго ударяются о стенки вакуумной камеры. К сожалению, анализ информации с цифровой камеры не позволяет однозначно ответить на вопрос, в каком месте происходит замерзание капель и образуются гранулы. Однако то, что капли не разрушаются после первого шлюза и упруго отражаются от стенок вакуумной камеры, может означать, что фазовый переход уже начался и их можно считать твердыми гранулами.

Скорость гранул при прохождении первого шлюза значительно возрастает, а при прохождении второго шлюза почти не изменяется. Для определения скорости гранул на выходе из шлюзов использовалась следующая методика. С помощью системы контроля каплеобразования фиксировались траектории движения гранул на выходе из шлюзов.

Изображения траекторий оцифровывались и запоминались в памяти ЭВМ. С помощью специального программного обеспечения определялся путь, пройденный гранулой. Зная путь и длительность импульса подсветки, можно определить скорость гранулы. После обработки нескольких сотен фотографий было получено, что средняя скорость гранул на выходе из шлюзов составляет примерно 80 м/с.

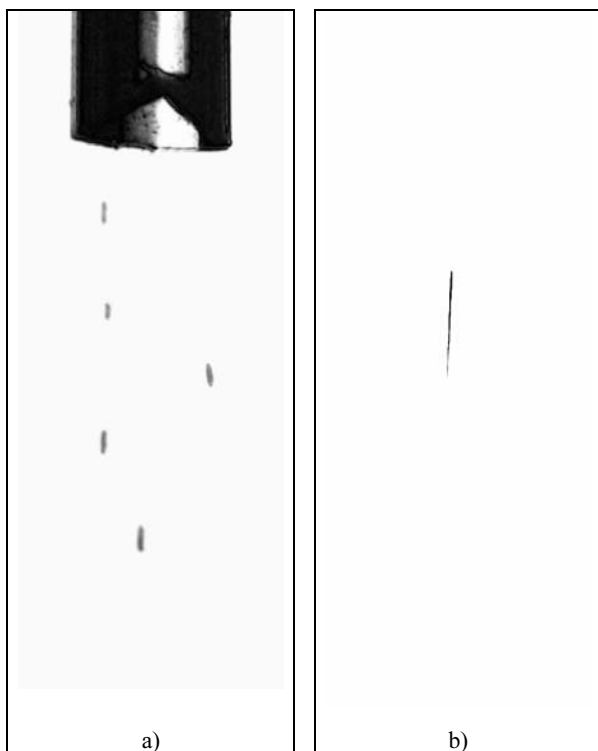


Рис. 3. Гранулы на выходе из первого шлюза(а); гранула на выходе из второго шлюза (б)

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в экспериментах результаты свидетельствуют о работоспособности экспериментальной установки и возможности использования элементов установки в криогенной корпускулярной мишени.

Как показали эксперименты по исследованию режимов распада струй водорода на капли, распад струи на капли приобретает устойчивый характер при температуре генератора капель ≈ 17 К. Дальнейшее падение температуры приводит к замерзанию водорода или в узком выходном шлюзе переохладителя или на выходе из генератора капель. Процесс устойчивого каплеобразования можно восстановить путём нагрева конденсатора и последующего охлаждения до рабочей температуры.

Однако в силу большой инерционности процессов нагрева и охлаждения внутренних элементов криостата процесс восстановления устойчивого каплеобразования занимает несколько часов.

Эксперименты также показали, что уменьшение давления в камере тройной точки хотя бы на 20 % приводит к резкому замерзанию струи водорода на выходе из генератора капель с образованием разнообразных кристаллических структур. Таким образом, для получения устойчивого потока капель необходима стабилизация основных рабочих параметров установки: давления и температуры в конденсаторе и давления в камере тройной точки.

Кроме того, из экспериментов по исследованию режимов распада струй водорода на капли следует, что модель тепловых процессов, происхо-

дящих в мишени, предложенная в [5], недостаточно точно описывает реальный процесс распада. Для уточнения модели необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования.

Как показали эксперименты по получению гранул из жидкого водорода, капли, не разрушаясь, проходят оба шлюза. То, что капли не разрушаются после первого шлюза и упруго отражаются от стенок вакуумной камеры, может означать, что фазовый переход уже начался и их можно считать твёрдыми гранулами. К сожалению, анализ информации по прохождению капель через первый и второй шлюзы не позволяет однозначно ответить на вопрос, в каком месте установки происходит замерзание капель и образуются гранулы. Для точного ответа на этот вопрос необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Проходя первый шлюз капли ускоряются и на выходе из шлюза приобретают скорость примерно 80 м/с. Однако из-за разброса капель по углам выхода из первого шлюза во вторую вакуумную камеру попадает чуть больше 10% всех гранул. Для выяснения причин разброса по углам выхода и его уменьшения необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Данная работа была поддержана следующими грантами: проект МНТЦ №1966, РФФИ 02-02-16349d, DFG 436 RUS 113173910(R), DFG-РФФИ 03-02-04013d, ФЯФ-FNP 40.052.1.1.1113.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Trostell B.** Status of the Hydrogen Micro-Sphere Target Development // University of Uppsala, Sweden, 1992-08-18/14:04. 1992. P. 1-20.
2. **Chernyshev V.** Future Activities of ITEP. Status of the Pellet Target. // Held at Institute for Theoretical and Experimental Physics. Moscow. July 2000.
3. **Status of pellet target preparation for ANKE.** // W. Borgs, A. Boukharov, M. Buesher etc. // Annual Report. Institute for Nuclear Physics and COSY Research. Forschungszentrum Jülich. 1999.
4. **Монодиспергирование** вещества: принципы и применение. / Е.В. Аметистов, А.К. Городов, А.С. Дмитриев и др. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. **Криогенные** корпускулярные мишени. Концепция и основная модель. // А. В. Бухаров, А. Ф. Гиневский, В. П. Чернышев и др. // Препринт МЭИ №17-17. Издательство МЭИ, 2002.
6. **Криогенные** корпускулярные мишени. Генерация гранул водорода: расчет основных конструктивных элементов, экспериментальный стенд, тесты. // В. Н. Афонасьев, В. Боргс, А. В. Бухаров и др. Препринт ИТЭФ №9-05. М.: Издательство ИТЭФ, 2005.
7. **Рэлей Дж. В.** Теория звука // Т. 2. Государственное издательство технико-теоретической литературы, М.: 1955 г.