

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*А. В. Бухаров<sup>1</sup>, Е. В. Вишневский*

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Развитие ускорительной и лазерной техники сделало возможным получение высокоэнергетич- ных пучков излучения. Взаимодействие таких пучков с монодисперсными мишенями позволит: изучать вещество в экстремальном состоянии; создавать компактные ускорители электронов, про- тонов и тяжелых ионов; даст возможность производить изотопы и разрабатывать новые методы в ядерной медицине; создавать новые источники излучения для микро- и наноэлектроники. В статье представлены результаты исследования проблем получения и использования в прикладных задачах ускорительной техники монодисперсных мишеней из криогенных жидкостей (водород, азот и т. д.) и различных металлов.

Development of accelerating technique made possible receiving the high-energy beams of radiation. Interaction of such beams with cryogenic mono-disperse targets will allow one to solve a number of fundamental problems of nuclear physics: to study substance in an extreme state; to create compact accelerators of electrons, protons and heavy ions; will give the chance to make isotopes and to develop new methods in nuclear medicine; to create new sources of radiation for micro- and nanoelectronics. Results on a research of receiving and use of monodisperse targets from cryogenic liquids (hydrogenium, nitrogen, etc.) and various metals in applied problems of accelerating technique are presented in the report.

PACS: 29.20.-c; 29.90.+r; 41.75.Jv

## ВВЕДЕНИЕ

Основой ряда областей науки и техники таких, как эксперименты на ускорителях и новые лазерные технологии, является взаимодействие высокоэнергетичных радиационных пучков с веществом мишени.

В экспериментах на ускорителях взаимодействие высокоэнергетичного пучка с мише- нью используется для решения фундаментальных проблем физики элементарных частиц и для изучения экстремальных состояний материи [1, 2].

В новых лазерных технологиях взаимодействие высокоэнергетичного лазерного из- лучения с мишенью приводит к образованию плазмы с сильным продольным электро- статическим полем и появлению ультрафиолетового излучения с экстремально малой длиной волны (extreme ultra violet — EUV) [3]. Использование EUV-излучения в на- нотехнологическом процессе изготовления микросхем позволит существенно повысить

---

<sup>1</sup>E-mail: boukharov@mail.ru

плотность насыщения микросхем полупроводниковыми элементами. Если дополнительный пучок электронов правильно инжектировать в образовавшееся плазменное поле, то его можно эффективно ускорить. Причем в этом случае темп ускорения может достигать 100 МэВ/мм. Высокий темп ускорения позволяет существенно уменьшить размеры ускорителя и создавать так называемые настольные ускорители [4]. В свою очередь, взаимодействуя с ускоренными электронами, плазма сама может стать источником различных ядерных излучений. Вид излучения зависит от интенсивности пучка и от вещества мишени. При высокой интенсивности излучения и специально выбранном веществе мишени возможен целый спектр термоядерных реакций с выходом нейтронов,  $\gamma$ -квантов,  $\alpha$ -частиц и других ядерных излучений [5].

В настоящее время широкое применение нашли мишени следующих типов: газовые, кластерные, жидкие и твердые криогенные мишени, мишени из фольги, проволочные мишени. Однако мишени старых типов не позволяют реализовать все возможности новой ускорительной техники. Вызвано это тем, что такие мишени имеют следующие недостатки: большая фоновая засветка; малая точность (вследствие больших размеров мишени) определения места и характеристик произошедшего взаимодействия; длительное время восстановления мишенью своего первоначального состояния.

От этих недостатков свободны монодисперсные мишени, представляющие собой потоки одинаковых жидких капель или твердых гранул (мишеней) размером от 10 мкм до 1 мм, скоростью до 100 м/с и частотой появления в точке взаимодействия до 500 кГц. Мишени обладают уникальными свойствами: высокой светимостью  $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , идеальной сферичностью; им не нужно дополнительного внешнего охлаждения; отсутствует наведенная активность; мишень можно использовать много раз; дисперсия по скорости, размеру и точке взаимодействия с пучком не превышает 0,1 %.

В основе получения мишеней — теория Рэлея–Вебера [6]. В соответствии с этой теорией любая жидкая струя неустойчива к внешним возмущениям поверхности. При определенном соотношении между скоростью струи, диаметром струи, вязкостью и частотой внешнего возмущения струя распадается на капли с минимальным разбросом по скорости и размерам (монодисперсные капли). В целом теория Рэлея–Вебера адекватно описывает процесс получения монодисперсных капельных потоков, начиная от струй криогенных жидкостей и кончая струями расплавленного металла.

Наиболее интересны, с точки зрения возможных применений, монодисперсные мишени из криогенных жидкостей и металлические мишени. Ниже представлено описание принципа работы, возможный конструкционный вид и результаты экспериментальных исследований характеристик установок по получению монодисперсных криогенных и металлических мишеней.

## 1. КРИОГЕННЫЕ МОНОДИСПЕРСНЫЕ МИШЕНИ

В общем виде криогенные монодисперсные мишени представляют собой поток твердых одинаковых гранул (мишеней) малых размеров, получаемых из предварительно сжиженного газа. Принцип работы установки по получению криогенных монодисперсных мишеней представлен на рис. 1. Конструкционными элементами установки являются: криостат; генератор сферических монодисперсных капель; система вакуумных камер со шлюзами и ловушка. Струя жидкого криоагента вытекает из генератора капель в первую вакуумную камеру. В этой камере поддерживается давление, равное давлению трой-

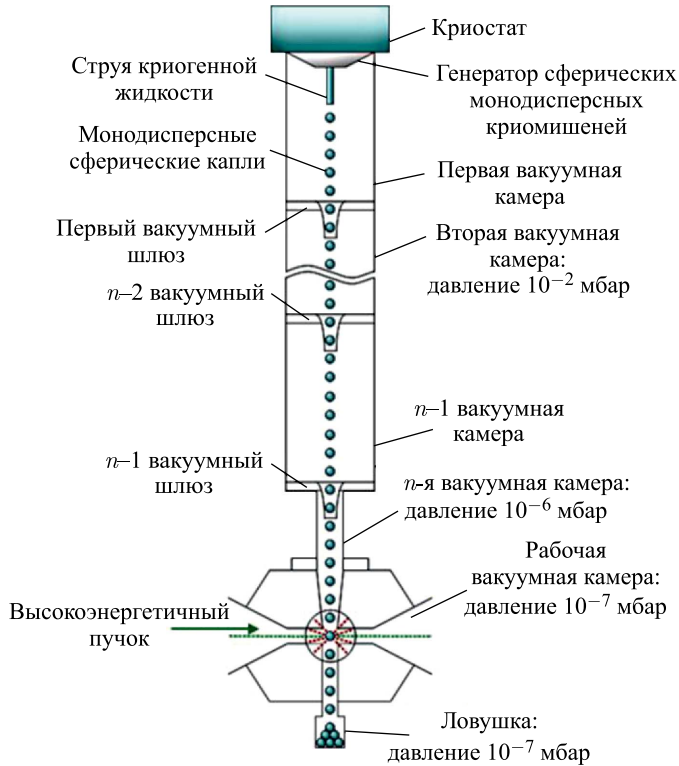


Рис. 1. Принцип работы установки по получению криогенных мишеней

ной точки. Под действием специального возмущения, накладываемого на жидкую струю, струя распадается на одинаковые капли. Капли через первый вакуумный шлюз попадают во вторую вакуумную камеру. В этой камере за счет интенсивного испарения происходит охлаждение капель, капли замерзают и становятся твердыми гранулами. Замерзшие гранулы, проходя через систему шлюзов, ускоряются и поступают в рабочую камеру, где и взаимодействуют с ускорительным пучком или лучом лазера. Для уменьшения натекания газа в рабочую камеру и увеличения скорости гранул можно использовать несколько камер с низким давлением, разделенных между собой шлюзами. После взаимодействия с высокоэнергетичным пучком гранулы попадают в охлаждаемую ловушку и осаждаются на ее стенках [7, 8].

Мишени такого типа уже являются элементом следующих научных программ: «WASA CELSIUS» (Швеция), «COSY» FZJ (Юлих, Германия) и CSPm (Ланьчжоу, Китай). Кроме того, криогенная монодисперсная мишень рассматривается как наиболее важный элемент эксперимента PANDA — уникального эксперимента в рамках проекта нового европейского ускорителя FAIR в г. Дармштадте (Германия).

**1.1. Экспериментальная установка по получению криогенных мишеней.** Для исследования теплофизических и конструкционных проблем получения криогенных корпускулярных мишеней в результате совместной работы МЭИ, ИТЭФ и FZJ была создана экспериментальная установка. Внешний вид установки представлен на рис. 2. Установка раз-

работывалась в рамках проекта по созданию криогенной мишени для детектора PANDA при поддержке грантами МНТЦ № 1966, INTAS 06-100012-8787, РФФИ 07-08-00747а, DFG-РФФИ 08-08-91950-ННИОа, DFG-РФФИ 09-08-91331-ННИОа.



Рис. 2. Внешний вид установки по получению криогенных мишеней

В состав установки входят следующие элементы и системы: криостат, вакуумные протертые камеры, ловушка гранул, вакуумная система, система подачи охлаждаемого вещества, система обеспечения жидким криоагентом внутренней и внешней ванн, системы генерации монодисперсных капель и измерительная система.

Главным элементом установки является криостат, представляющий собой цилиндрический сосуд с внешним диаметром 410 мм и высотой 1300 мм, изготовленный из нержавеющей стали. Криостат содержит: внутреннюю и внешнюю ванны, теплообменники, конденсатор, генератор монодисперсных капель, камеру тройной точки, две вакуумные камеры со шлюзами и юстировочный узел.

Вытекающая в камеру тройной точки криогенная струя разбивается на капли с помощью генератора капель, представляющего собой медный цилиндр, внутри которого расположены пьезоэлементы. С помощью пьезоэлементов на поверхности струи возбуждаются капиллярные волны, и струя распадается на одинаковые капли. Для формирования тонкой

струи на конце генератора крепится сопло с малым выходным отверстием. Минимальный диаметр выходного отверстия сопла составляет 10 мкм.

Для минимизации воздействия внешних и внутренних шумов разработана специальная безвибрационная схема получения криогенных мишеней. Основными элементами схемы являются четыре теплообменника и две ванны для охлаждающих веществ. Подробное описание схемы представлено в [9]. Подбирая охлаждающие вещества в ваннах, можно получать криогенные мишени из любых газов.

Так, для получения монодисперсных капель водорода необходимо заполнить внутреннюю ванну жидким гелием, а внешнюю ванну азотом. Монодисперсные капли азота можно получить, заполнив и внешнюю и внутреннюю ванны жидким азотом. Для получения монодисперсных капель аргона необходимо внешнюю ванну заполнить жидким аргоном, а внутреннюю ванну жидким азотом.

Контроль над теплофизическими процессами, происходящими в криостате, осуществляется с помощью системы датчиков давления и температуры. Для окончательной обработки показаний датчиков и визуализации полученной информации используется специально разработанное программное обеспечение.

Характеристики капель и гранул регистрируются с помощью специальной диагностической системы. В состав системы входят четыре CCD-камеры и два строботометра

СТ-МЭИ. Строботахометр подсвечивает капли и гранулы короткими световыми импульсами (длительность импульса  $\sim 1$  мкс). Две камеры используются для пространственного наблюдения процесса каплеобразования. Две другие установлены на выходе из шлюза и используются для наблюдения и определения параметров гранул. Изображения капель и гранул обрабатывались с помощью специального программного обеспечения. Результатом обработки являлась следующая информация: размер капель и гранул, скорость капель и гранул, величина угловой и пространственной расходимости потока.

**1.2. Эксперименты по получению криогенных мишеней.** На описанной выше установке были проведены эксперименты по получению монодисперсных капель и гранул из жидкого водорода, азота и аргона. В ходе экспериментов по исследованию капиллярного распада криогенных струй впервые определена граница начала области рэлеевского распада, определены параметры области монодисперсного распада и получен монодисперсный распад тонких струй водорода, азота и аргона диаметром от 5 до 30 мкм. Минимальный диаметр струй водорода составлял 7 мкм, а минимальный диаметр струй азота — 5 мкм. Результаты экспериментов приведены на рис. 3 и в работах [9–11].

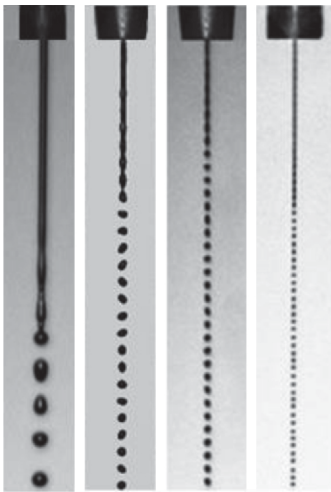


Рис. 3. Монодисперсный распад струй водорода, азота и аргона

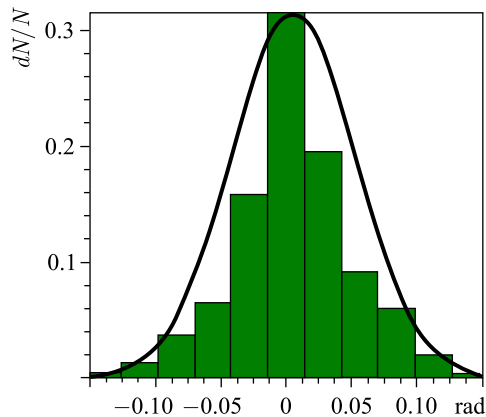


Рис. 4. Распределение гранул по углу вылета из шлюза  $\sigma_\varphi = 0,047$  рад

В экспериментах по получению гранул были достигнуты монодисперсные потоки твердых гранул водорода диаметром от 12 до 60 мкм и скоростью до 70 м/с. Впервые измерены величины угловой и пространственной расходимости потока. Результаты экспериментов приведены на рис. 4. Установлено, что распределение гранул по углу вылета из шлюза соответствует нормальному распределению. Причем среднеквадратичное угловое отклонение  $\sigma_\varphi = 0,047$  рад.

**1.3. Высокоскоростные криогенные монодисперсные мишени.** Наиболее сильное влияние на стабильность потока мишеней оказывают шлюзы, и особенно первый шлюз, соединяющий камеру тройной точки с другими вакуумными камерами. Если убрать первый шлюз, не дать жидкой криогенной струе замерзнуть и сразу направить капли во

вторую вакуумную камеру, то можно значительно упростить конструкцию установки и уменьшить ее размеры.

Для анализа процесса остывания тонких жидких струй при их инжекции в камеру с малым давлением в программной среде PHOENICS была создана соответствующая модель и численным методом исследовано распределение температуры на поверхности струй водорода, азота и аргона в зависимости от следующих параметров: диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере [12]. Результаты некоторых расчетов представлены на рис. 5 и 6. На рис. 5 приведено изменение температуры струи водорода диаметром 10 мкм при скорости 100 м/с и давлении в камере 100 Па. На рис. 6 представлено изменение температуры струи водорода диаметром 20 мкм при скоростях: 130, 150, 180 и 200 м/с и давлении в камере 100 Па.

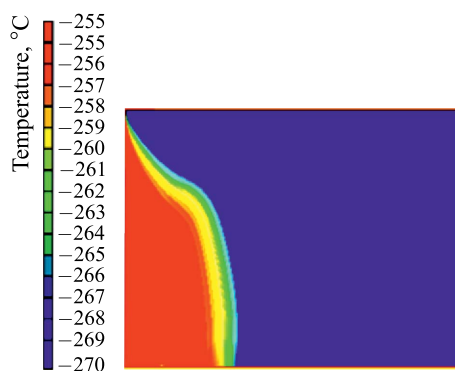


Рис. 5. Температура струи  $H_2$ ,  $D = 10$  мкм,  $P = 100$  Па и  $V = 100$  м/с

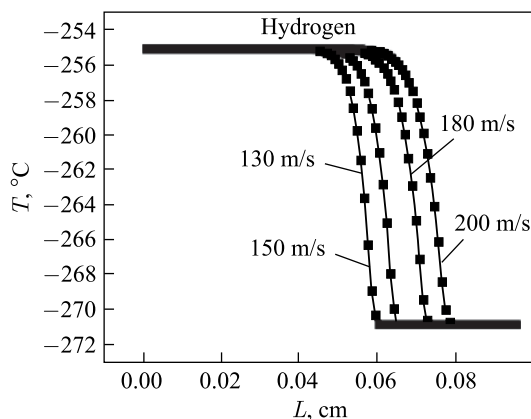


Рис. 6. Температура струи  $H_2$ ,  $D = 10$  мкм, при различных скоростях истечения

Таким образом, в соответствии с расчетами при вводе тонких жидких криогенных струй со скоростью большей 100 м/с в вакуум струи криогенных жидкостей на расстоянии до 1 мм не успевают замерзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счет испарения охлаждаются и становятся гранулами. Высокоскоростные криогенные монодисперсные мишени обладают рядом преимуществ: это непосредственный ввод в вакуум (нет необходимости в камере тройной точки и шлюзах); возможность получения мишени диаметром меньше 20 мкм из различных криогенных жидкостей ( $H_2$ ,  $D_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ...); дисперсия параметров меньше 1%; высокая скорость гранул; точная синхронизация момента попадания гранулы в пучок с моментом включения датчиков.

## 2. МОНОДИСПЕРСНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ

В общем виде монодисперсные металлические мишени представляют собой поток твердых монодисперсных гранул малых размеров, получаемых из расплавленного металла. Принцип работы установки по получению металлических монодисперсных мишеней представлен на рис. 7. Основными конструктивными элементами установки явля-

ются: тигель с расплавленным металлом; генератор монодисперсных капель; система вакуумных камер и шлюзов; ловушка. Дополнительные элементы: система стабилизации давления, система возбуждения, система зарядки и система управления движением гранул. Если предварительно зарядить с помощью системы зарядки капли, то, подав управляющие сигналы на систему отклонения, можно управлять траекторией капельного потока. Это очень важная особенность металлических мишеней. Управление потоком дает возможность точно согласовывать момент взаимодействия мишени с пучком.

Работа установки по производству монодисперсных мишеней происходит следующим образом. Струя расплавленного металла вытекает из генератора капель в первую камеру, заполненную охлаждающим газом. Под действием специального возмущения, накладываемого на жидкую струю, струя распадается на одинаковые капли. В первой камере за счет взаимодействия с газом происходит предварительное охлаждение капель. Проходя через шлюзы и вакуумные камеры, капли замерзают и становятся твердыми гранулами. Монодисперсные твердые гранулы поступают в рабочую камеру, где происходит взаимодействие с ускорительным или лазерным пучком. Шлюзы обеспечивают минимальное натекание в рабочую камеру. Для уменьшения натекания можно использовать две и более вакуумные камеры, разделенные между собой шлюзами.

**2.1. Экспериментальная установка по получению металлических мишеней.** Для исследования теплофизических и конструкционных проблем получения металлических мишеней была создана экспериментальная установка [13]. Установка дает возможность изучать теплофизические проблемы получения монодисперсных металлических мишеней из различных металлов и их сплавов с температурой плавления до 1600 °С. Расположение основных элементов установки и ее внешний вид представлены на рис. 8 и 9.

Установка состоит из таких основных систем, как генератор капель 1 с системой возбуждения, система нагрева с тиглем 2, теплообменная камера 5 с внешней частью 4, охлаждаемая ловушка, система стабилизации давления, система контроля температуры с термопарными датчиками 3, система контроля давления, система наблюдения и система

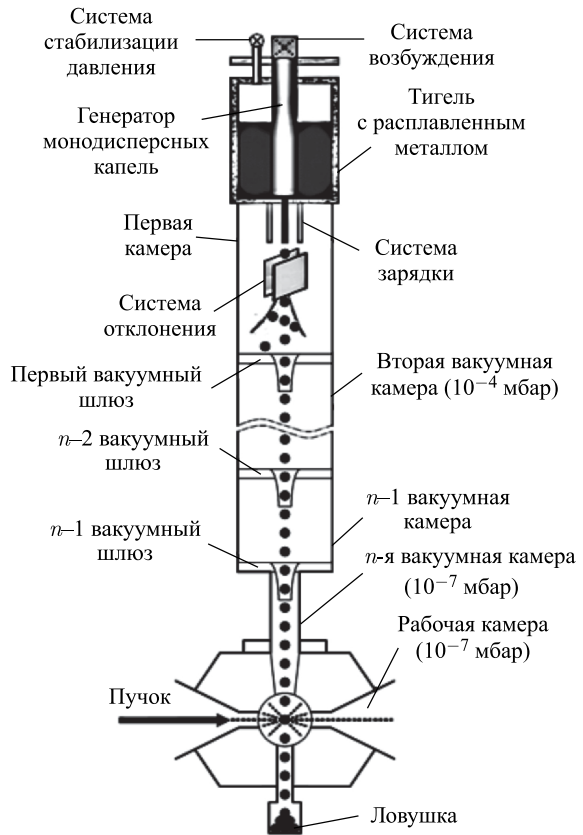


Рис. 7. Принцип работы установки по получению металлических мишеней





Рис. 8. Внешний вид установки

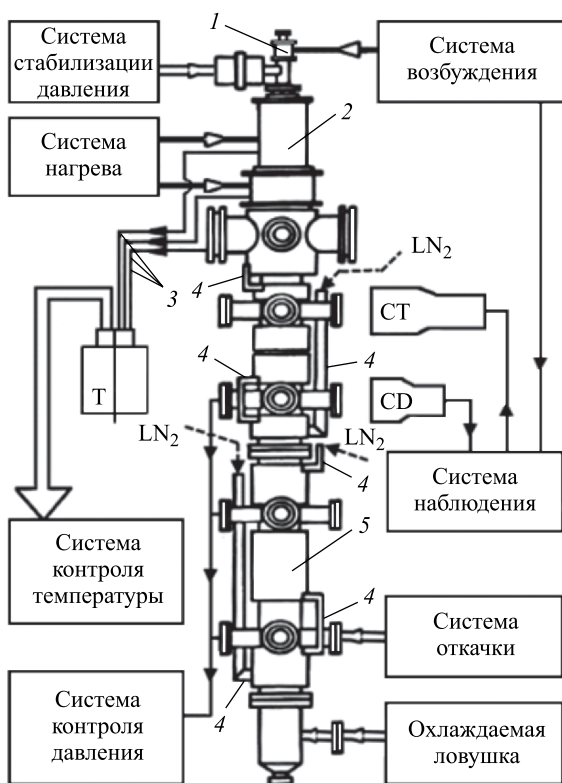


Рис. 9. Расположение элементов установки

откачки.

С помощью системы нагрева в тигле 2 получается расплавленный металл. Над расплавом в тигле создается избыточное давление. Давление регулируется и поддерживается на необходимом уровне с помощью системы стабилизации. На вход системы стабилизации поступает гелий, очищенный от кислорода. На выходе из тигля образуется струя жидкого металла. С помощью системы возбуждения и пьезоэлемента 1 на струе создаются капиллярные волны. При определенном соотношении между скоростью струи, диаметром струи, вязкостью и частотой внешнего возбуждения струя распадается на монодисперсные капли. Меняя диаметр выходного отверстия тигля, можно получать струи металла с диаметрами от 30 до 400 мкм. Распад струи на капли происходит в теплообменной камере 5, заполненной чистым гелием. Для откачки теплообменной камеры перед заполнением гелием используется система откачки.

Контроль над теплофизическими процессами, происходящими в теплообменной камере, осуществляется с помощью системы контроля давления и системы контроля температуры. С помощью ЭВМ осуществлялась обработка показаний датчиков и визуализация полученной информации.

Контроль над распадом струи на капли осуществлялся с помощью системы наблюдения, строботометра СТ-МЭИ и цифровой телекамеры CD (PixelFly фирмы «Pro.imaging»). Строботометр СТ подсвечивал струю и капли короткими световыми импуль-



сами (длительность импульса порядка 1 мкс). Цифровая телекамера CD (PixelFly фирмы «Pro.imaging») использовалась для фиксации процессов, происходящих при образовании капель.

**2.2. Эксперименты по получению монодисперсных металлических мишеней.** С помощью описанной выше экспериментальной установки были получены монодисперсные гранулы из различных металлов (Pb, Sn, Sb, Zn, Al, Cu, Nd и стали). Диаметр гранул от 30 мкм до 1,5 мм. Дисперсия по диаметру гранул составляет 1–2%. Полученные методом ВКРС гранулы имеют сферическую форму. Коэффициент несферичности не превышает 1%. В качестве примера на рис. 10, *а* представлено фото гранул стали с диаметром от 130 до 350 мкм, а на рис. 10, *б* — гранул свинца диаметром 90 мкм.

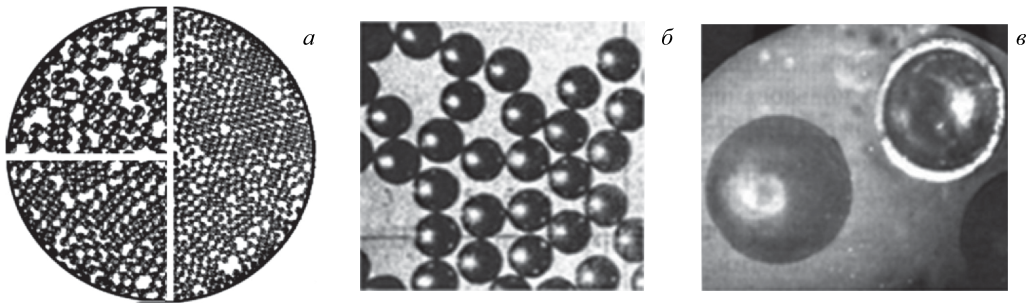


Рис. 10. Примеры металлических мишеней: *а*) гранулы стали диаметром от 130 до 350 мкм; *б*) гранулы Pb диаметром 90 мкм; *в*) полые гранулы Cu с внешним диаметром 1,4 мм и толщиной стенки 30 мкм

Были проведены эксперименты по получению полых гранул. Для этого был специально изготовлен тигель. Выходное отверстие тигля представляло собой два соосных отверстия. Через внешнее отверстие вытекала струя расплавленного металла, а через внутреннее отверстие в струю подавался газ. Экспериментально определены расходы металла и газа, при которых струя распадается на полые монодисперсные капли. На рис. 10, *в* показаны фото полых гранул меди с внешним диаметром 1,4 мм и толщиной стенки 30 мкм. Дисперсия полых гранул по диаметру, толщине стенки и несферичности составляет 1–2%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Бухаров А. В., Дмитриев А. С.* Криогенные корпускулярные мишени в энергетике. М.: Изд-во МЭИ, 2013. 144 с.
3. *Belyaev V. S., Matafonov A. P., Krainov V. P., Lisitsa V. S.* Fast Charged Particles and Super Strong Magnetic Fields Generated by the Interaction of High-Intensity Ultra Short Laser Pulses with Solid Targets // *Usp. Fiz. Nauk.* V. 178, No. 8. P. 823–847.
4. *Dawson John M.* Plasma Particle Accelerators // *Sci. American.* 1989. V. 260, No. 3. P. 54–61.
5. *Bayanov B. F., Belov V. P., Taskaev S. Yu.* Neutron Producing Target of the Accelerator Based Neutron Source for Neutron-Capture Therapy. BINP Preprint 2005-4. Novosibirsk, 2005.

6. *Rayleigh L.* On the Instability of a Cylinder of Viscous Liquid under Capillary Force // *Phil. Mag.* 1892. V. 34. P. 145–154.
7. Бухаров А. В., Гинеvский А. Ф., Чернышев В. П. и др. Криогенные корпускулярные мишени. Концепция и основная модель. Препринт № 17-17. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 35.
8. Бухаров А. В., Чернышев В. П., Чернецкий В. Д., Бюшер М. Способ получения криогенной корпускулярной мишени и устройство для его осуществления. Пат. 2298890 Российская Федерация, МПК Н 05 Н 3/00. № 2005132792; опубли. 10.05.07. Бюл. № 13. 6 с.
9. *Boukharov A. V., Ametistov E. V., Ginevsky A. F., Bukharova M. A.* Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets // *Probl. Atom. Sci. Tech., Ser.: Nucl. Phys. Res.* 2013. No. 6. P. 205–208.
10. *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.
11. Бухаров А. В., Бюшер М., Герасимов А. С., Гинеvский А. Ф. Использование криогенной корпускулярной мишени для экспериментов по лазерному ускорению заряженных частиц // ВАНТ. Сер. «Ядерно-физ. исслед.». 2010. № 2. С. 60–63.
12. *Boukharov A., Vishnevskii E.* High Speed Cryogenic Monodisperse Targets for High Intensity Cyclic and Linear Accelerators // *Proc. of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, 2016.* P. 532–534.
13. *Ankudinov V. B., Boukharov A. V., Ogorodnikov V. P., Marukhin Y. A.* New Type of Metal Targets // *Probl. Atom. Sci. Tech., Ser.: Nucl. Phys. Res.* 2014. No. 3. P. 190–192.