

УДК 621.039.633

КРИОГЕННОЕ ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ МИШЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ LAPLAS)

*И.В. Александрова¹, Е.Р. Корешева^{1,2}, Е.Л. Кошелев¹, О.Н. Крохин^{1,2}, А.И. Никитенко¹, И.Е. Осипов^{1,3},
Т.П. Тимашева¹*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ООО «ЦЭ Интер РАО ЕЭС», Москва, Россия

Для проведения экспериментов по программе инерциального термоядерного синтеза (ИТС) в схеме LAPLAS на установке FAIR с тяжелоионным драйвером требуются цилиндрические мишени с криогенным топливным ядром. В данной статье представлен подробный анализ проблемы производства и доставки таких мишеней в центр экспериментальной камеры. Предложена концепция специализированного устройства на основе бесподвесного подхода для частотного пополнения экспериментов LAPLAS цилиндрическими криогенными мишенями.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), бесподвесный подход (FST), криогенное водородное топливо.

CRYOGENIC HYDROGEN FUEL FOR CONTROLLED INERTIAL CONFINEMENT FUSION (CYLINDRICAL TARGETS FOR THE LAPLAS EXPERIMENTS)

*I.V. Aleksandrova¹, E.R. Koresheva^{1,2}, E.L. Koshelev¹, O.N. Krokhin^{1,2}, A.I. Nikitenko¹, I.E. Osipov^{1,3},
T.P. Timasheva¹*

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

³*Inter RAO UES, Power Efficiency Centre, Moscow, Russia*

In inertial confinement fusion (ICF) research, cylindrical cryogenic targets are required to carry out the experiments according to LAPLAS scheme on FAIR facility. In this paper, a thorough analysis of the problem of such targets fabrication, delivery and positioning in the center of the experimental chamber has been made. Based on free-standing target approach, particular attention is paid to the issue of a specialized cryogenic system development intended for rep-rate supply of the LAPLAS experiments with the cylindrical cryogenic targets.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), free-standing target (FST) approach, cryogenic hydrogen fuel.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-34-65

ВВЕДЕНИЕ

Результатом многолетней работы авторов в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) явилось создание уникальной технологии FST-формирования топливного слоя в движущихся бесподвесных сферических оболочках. Наиболее важные результаты, достигнутые в ФИАН в рамках программы по развитию FST-технологии, включая и мишени реакторного класса, представлены в цикле работ [1—5]. Отметим, что принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями free-standing target (FST) применим не только для формирования сферических криогенных мишеней, но также и цилиндрических, необходимых для проведения экспериментов по схеме LAPLAS (Laboratory PLANetary Science — лабораторные планетарные исследования) в частотном режиме [6—8].

В данной работе обсуждаются основные результаты, полученные в ФИАН к настоящему времени в области формирования и частотной доставки цилиндрических криогенных мишеней.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Коллаборация HEDgeNOB (High Energy Density Generated by Intense Heavy Ion Beams — высокая энергия и плотность, создаваемые с помощью тяжелоионных пучков) планирует осуществить цикл экспериментальных исследований в области изучения состояния вещества с высокой плотностью и энергией, создаваемого с помощью тяжелоионных пучков на установке FAIR (Facility for Antiproton and Ion

Research — установка для исследования антипротонов и ионов) [6—8]. В частности, в рамках экспериментов LAPLAS предполагается осуществить низкоэнтропийное сжатие вещества с малым Z (замороженный до твёрдого состояния водород или дейтерий, так называемое криогенное ядро), защищённого цилиндрической оболочкой из материала с большим Z (золото или свинец, так называемая внешняя оболочка мишени). Цель этих экспериментов — изучение вопроса металлизации водорода, а также создание и изучение поведения материи в условиях, сходных с теми, которые существуют внутри гигантских планет.

Предметом настоящего исследования, проведённого в ФИАН, являлось проектирование специализированной криогенной системы (СКС) для изготовления и доставки многослойных цилиндрических криогенных топливных мишеней (КТМ) в центр экспериментальной установки для проведения экспериментов LAPLAS. Поскольку данные эксперименты должны обеспечиваться мишенями с частотой не менее одна штука в час, то использование мишеней, укреплённых на каком-либо подвесе, становится невозможным. Поэтому в данной работе рассматривались способы изготовления и доставки только незакреплённых КТМ (так называемый бесподвесный подход, основанный на технологии FST). Основным преимуществом бесподвесного подхода является минимизация пространственных и временных масштабов всех производственных операций, что обеспечивает возможность:

- скоростного транспорта КТМ между элементами СКС;
- непрерывного функционирования СКС с заданной частотой доставки КТМ в зону облучения.

Кроме того, бесподвесный подход позволяет минимизировать запасы радиоактивного трития при работе с криогенным D—T-топливом [1].

При создании СКС необходимо решить не только проблемы изготовления КТМ, но также проблемы сохранения качества её компонентов (оболочка из свинца и криогенное ядро) в процессе доставки и позиционирования, выбрать принцип доставки и позиционирования, определить оптимальные условия проведения всех процессов в системе. Исследования проведены в следующих направлениях:

- впервые изучена возможность изготовления цилиндрических КТМ с параметром $L/\varnothing = 5,00—6,25$ (где L и \varnothing — длина и диаметр криогенного ядра мишени соответственно). Исследованы возможные технологические подходы при создании элементов КТМ: криогенного твёрдородного ядра и цилиндрической оболочки из свинца;

- исследованы различные варианты сборки элементов КТМ, её доставки и позиционирования в центре экспериментальной камеры. Проведён анализ возможностей диагностики готовой КТМ;

- выполнено моделирование процесса нагрева КТМ до тройной точки твёрдого водорода (H_2) или дейтерия (D_2) при различных условиях теплообмена. Дана расчётная оценка и проведена оптимизация времени жизни КТМ в экспериментальной вакуумной камере с тёплыми стенками.

На основании проведённых исследований предложено два концептуальных дизайна СКС, нацеленных на минимизацию потенциальных рисков при функционировании системы.

ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КРИОГЕННОЙ ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ

Криогенная топливная мишень, предназначенная для экспериментов LAPLAS, состоит из внешней цилиндрической оболочки и криогенного топливного ядра (рис. 1). Основные характеристики КТМ и требования к качеству следующие:

Внешняя оболочка:

форма . . .	Полый цилиндр
материал . . .	Pb
плотность, $г/см^3$. . .	11,336
степень чистоты материала . . .	99,99%
масса, г . . .	1,08
внешний диаметр, мм . . .	$5,0 \pm 0,1$
внутренний диаметр, мм . . .	$(1—0,8) \pm 1\%$
длина, мм . . .	$5,0 \pm 0,1$
качество поверхности . . .	Полированная

Криогенное ядро:

форма . . .	Сплошной цилиндр
-------------	------------------

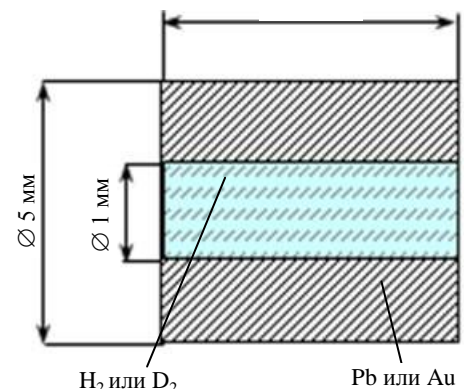


Рис. 1. Схема КТМ для экспериментов LAPLAS

материал . . .	Твёрдый H_2 и D_2
плотность, $г/см^3$. . .	0,087 (H_2), 0,197 (D_2)
допустимое количество добавок, % . . .	<0,01
масса, г . . .	$2,2 \cdot 10^{-4}$ (H_2), $5 \cdot 10^{-4}$ (D_2)
внешний диаметр, мм . . .	$(1-0,8) \pm 1\%$
длина, мм . . .	$5,0 \pm 0,1$
Температура мишени в момент облучения T . . .	$T < T_{тр}^*$

* $T_{тр}$ — температура тройной точки материала криогенного ядра.

Выбор метода изготовления внешней цилиндрической оболочки. В данном исследовании в качестве внешней оболочки КТМ, изображённой на рис. 1, рассматривается свинец.

Отметим основные физические и механические свойства свинца [4, 5], которые могут повлиять на выбор технологии изготовления цилиндрических оболочек требуемого качества:

— свинец легко куётся и прокатывается. Свинцовую проволоку получают, продавливая через фильеру не расплав, а твёрдый свинец. Обычным волочением её сделать нельзя из-за малой разрывной прочности свинца;

— при температуре $T = 7,18$ К свинец переходит в сверхпроводящее состояние, что следует учитывать как на этапе изготовления мишени, так и на стадиях доставки и позиционирования;

— свинец сравнительно малоактивен химически. Металлический блеск свежего разреза свинца постепенно исчезает на воздухе вследствие образования тончайшей плёнки PbO , предохраняющей образец от дальнейшего окисления;

— механические и физико-химические свойства свинца сильно меняются под влиянием примесей. Любая добавка к свинцу увеличивает его твёрдость.

Нами были проверены следующие варианты механической обработки свинца: токарная обработка, литьё, прессование, сверление. Наиболее удачные результаты были получены способом холодного прессования цилиндрического образца диаметром 5 мм и длиной 5 мм. Формой для создания образца служил отрезок тонкостенной трубки из нержавеющей стали внутренним диаметром 5 мм и толщиной стенок 0,2 мм. Далее формировались торцы свинцового цилиндра. Для этого цилиндр зажимался между двух стержней из лейкоапатита с полированными торцами и создавалось осевое нагружение. В результате у свинцового цилиндрического образца формировались гладкие полированные торцы. Внутренняя цилиндрическая полость диаметром 1 мм выполнялась

способом сверления (рис. 2, а). Общий вид полученной цилиндрической свинцовой оболочки показан на рис. 2, б.

Следует отметить, что получить полированные торцы свинцового цилиндра достаточно легко. Однако также легко торцы могут быть испорчены — для этого достаточно легкого нажатия ногтя. Проблема порчи касается и боковой поверхности цилиндра. Вопрос о сохранении качества поверхности при транспортировке готовой мишени между модулями СКС будет рассмотрен далее.

Анализ возможных методов для изготовления криогенного ядра. Для формирования цилиндрического криогенного ядра КТМ может быть использован метод экструзии твёрдого водорода через специальное сопло. Данная технология широко применяется для подготовки топливных

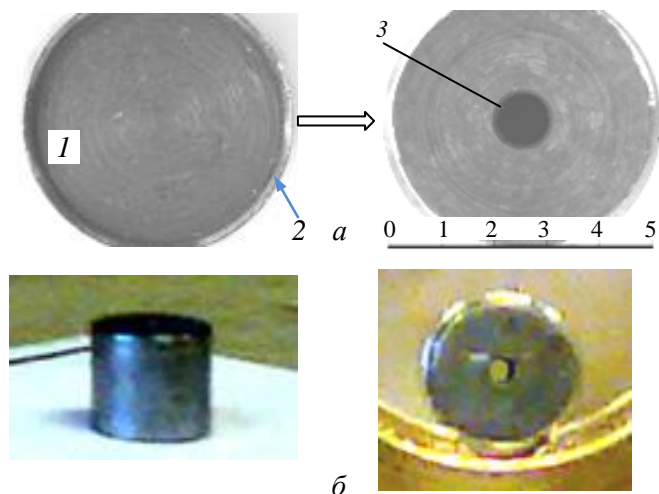


Рис. 2. Свинцовая оболочка: а — формирование внутреннего цилиндрического отверстия: 1 — свинцовый цилиндр, 2 — прессформа (трубка из нержавеющей стали), 3 — цилиндрическое отверстие диаметром 1 мм; б — общий вид оболочки сбоку и с торца

мишеней к экспериментам управляемого термоядерного синтеза (УТС). В работах [9—18] изготавливались цилиндрические таблетки из твёрдого H_2 , D_2 или трития, необходимые для непрерывного пополнения топливом установок типа токамак. Для проведения экспериментов в области инерциального термоядерного синтеза [19—23] были получены длинные цилиндрические стержни из твёрдого H_2 и D_2 . Диа-

метр стержней составлял от 0,04 до 1 мм при длине 25—100 мм. Минимальное время изготовления одного такого образца составляет менее 1 с.

Другим возможным вариантом формирования криогенного ядра КТМ является метод *in situ*. В инжекторах, работающих по принципу *in situ*, напуск водорода производится прямо в локально охлаждаемый ствол инжектора, где и формируется макрочастица.

В работе [24] дано подробное описание инжектора с поворотным колесом в криогенном узле, который был разработан в 1981 г. в Ленинграде и успешно проработал с 1982 по 1992 г. на установке токамак Т-10. Оптимальное время, требуемое на приготовление одного образца данным методом, составляет ~15 мин.

В различных лабораториях были разработаны подобные инжекторы с одним, четырьмя, восемью, девятью и даже двадцатью стволами [16, 24—32]. Перечислим основные особенности методов *in-situ* и экструзии, которые мы рассматриваем как наиболее перспективные для решения поставленной задачи формирования.

Метод *in-situ*:

— время приготовления одной мишени ~15 мин. Размер формируемого образца и его качество (размер неоднородностей типа кристаллических зёрен, пустот, трещин и пр.) существенно определяются условиями эксперимента: протяжённостью и температурой зоны контакта ствола инжектора с хладопроводом, давлением напускаемого топливного газа и временем его напуска, градиентом температуры вдоль ствола и др.;

— простая механика и электроника управления: нет или почти нет подвижных частей. Это даёт возможность крепления криогенного узла в криостате на проволочных растяжках, что существенно снижает теплопритоки;

— возможность создавать криогенное ядро с торцевой поверхностью требуемой формы (если требуется).

Метод экструзии (поршневой экструдер):

— малое время приготовления одной мишени — 1—2 с. Однако хорошего качества стержень выдавливается не сразу. Первые 10—15 мм стержня, как правило, не используются. Их отрезают и удаляют из системы. Как следствие, возникают повышенные требования к производительности вакуумной системы;

— возможность обеспечения криогенными мишенями эксперимента LAPLAS в режиме реального времени;

— метод перспективен для частотного производства реакторных мишеней.

Необходимо учитывать, что механические свойства твёрдого водорода обнаруживают чрезвычайную чувствительность к содержанию в образцах определённых примесей. Например, при наличии в кристалле нормального водорода ($n\text{-H}_2$) примеси неона в количестве всего от 0,01 до 0,001% ат. его пластичность существенно увеличивается [33, 34]. Наличие в водороде даже небольших изотопических добавок (HD или D_2) может привести к охрупчиванию и разрушению образца [35, 36]. Любые примеси, особенно азот, делают дейтерий хрупким, и экструзия оказывается невозможной [18]. Кроме того, примеси замораживаются в насадке экструдера и забивают его. Отсюда можно сделать два основных вывода:

— исходный материал (H_2 или D_2) должен иметь высокую степень чистоты — не хуже 99,99%;

— вакуум во внутренних объёмах СКС должен быть высоким — в интервале 10^{-3} — 10^{-6} торр.

В табл. 1 приведены сравнительные параметры твёрдородородных цилиндров, применяемых в различных экспериментах УТС и изготовленных как методом экструзии, так и методом *in situ*.

Т а б л и ц а 1. Сравнительные параметры твёрдородородных цилиндров, применяемых в различных экспериментах управляемого термоядерного синтеза

Эксперимент	\varnothing , мм	L , мм	L/\varnothing	Ссылки
Токамак	2—10	2—10	~1	[9—14, 18]
Z-пинч	0,04—0,5	50—100	300—2500	[15—17]
ИТС	0,4	10—20	25—50	[19]
LAPLAS	0,8—1,0	5,0	5,00—6,25	[6—8]

Примечание: \varnothing и L — диаметр и длина образца соответственно.

Как следует из табл. 1, формирование топливного ядра мишени в геометрии, предназначенной для экспериментов LAPLAS, никем ранее реализовано не было. Это означает, что при запуске СКС необхо-

можно провести оптимизацию параметров эксперимента, поскольку качество получаемых твёрдодородных цилиндров во многом зависит от геометрии образца, чистоты материала, температурного режима процессов формирования, доставки мишени и др.

БАЗОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ

Модуль изготовления и сборки (МИС) предназначен для формирования криогенного топливного ядра и его сборки с внешней свинцовой оболочкой цилиндрической мишени. Принципиальная схема МИС показана на рис. 3.

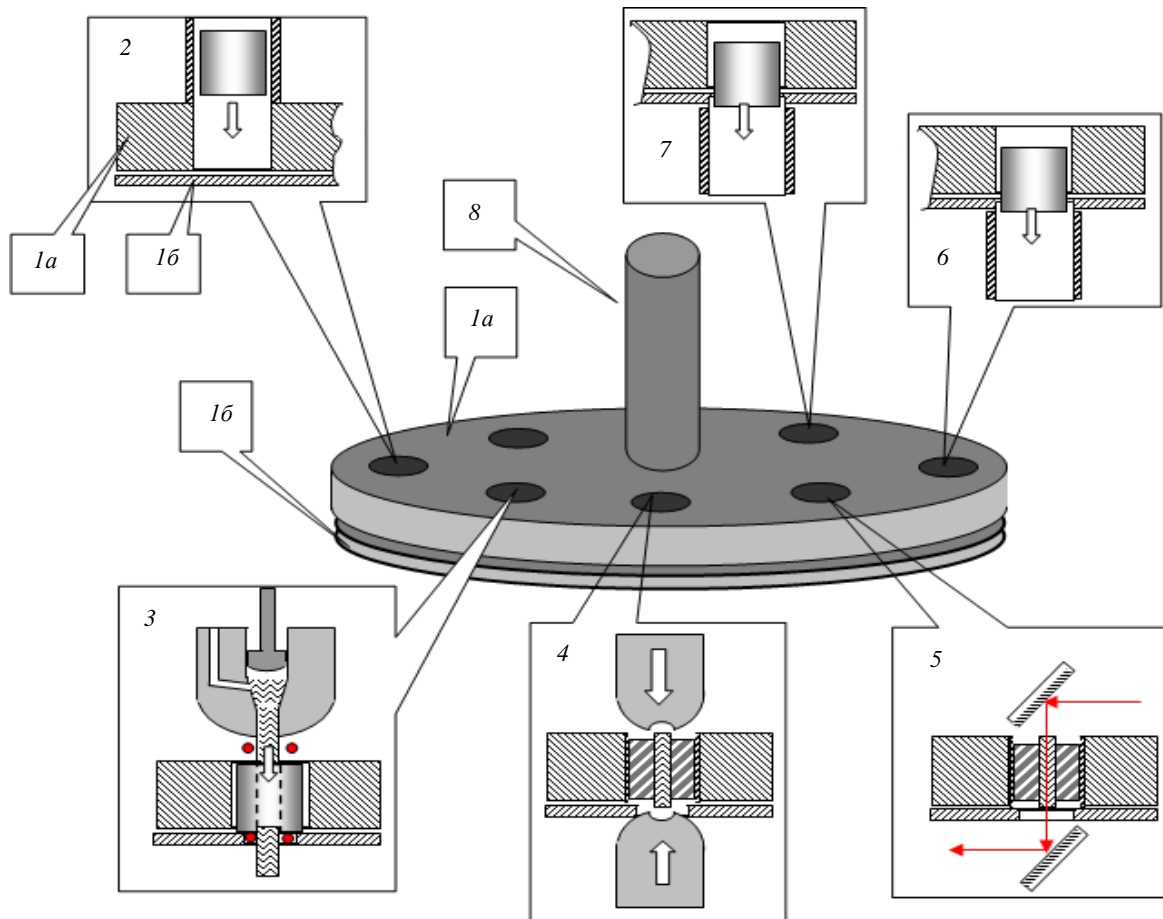


Рис. 3. Принципиальная схема МИС: 1а — подвижный диск ротационного сборочного узла (PCY); 1б — неподвижный диск PCY; 2 — узел загрузки свинцовых оболочек; 3 — модуль формирования криогенного ядра и его сборки со свинцовой оболочкой; 4 — узел формирования торцов криогенного ядра; 5 — система контроля качества криогенного ядра; 6 — узел ввода готовой криогенной мишени в модуль доставки; 7 — узел ввода негодных мишеней в накопитель; 8 — хладапровод

Один из основных элементов МИС — ротационный сборочный узел (PCY) состоит из двух дисков — подвижного (поз. 1а, рис. 3) и неподвижного (поз. 1б). По окружности верхнего, подвижного диска находятся специальные отверстия (мишеневые гнёзда), в которых может размещаться до семи цилиндрических мишеней. Верхний диск вращается в горизонтальной плоскости. Нижний диск неподвижен и также снабжён функциональными отверстиями, предназначенными для удобства работы с мишенью. Вращение верхнего диска позволяет подводить мишеневое гнездо от одного узла к другому, чтобы последовательно производить необходимые операции: загрузку свинцовых оболочек, создание твёрдодородного ядра (поз. 3), контроль качества мишени (поз. 5) и др. Ось вращения верхнего диска вертикальна, что позволяет легко реализовать гравитационный ввод свинцовых оболочек в PCY (поз. 2), перенести готовую КТМ из PCY в модуль доставки (поз. 6) либо отбракованную мишень в накопитель (поз. 7).

Оба диска выполнены из меди и поддерживаются при температуре 10—11 К. Охлаждение дисков осуществляется с помощью хладапровода (поз. 8). PCY окружён температурным экраном, который поддерживается при низкой температуре за счёт гелиевого теплообменника.

Порядок работы МИС следующий:

1. Загрузка цилиндрических оболочек из свинца в РСУ (поз. 1, рис. 3) под действием силы гравитации.

2. Вращением диска одна из оболочек подводится к выходу из экструзионной головки (поз. 3, рис. 3). Основные элементы экструзионной головки и размещение относительно неё цилиндрической свинцовой оболочки КТМ более детально показаны на рис. 4.

3. Производится экструдирование цилиндрического D_2 (или H_2)-стержня. Для этого к нагревателю в головке экструдера (поз. 6, рис. 3) подводят такую мощность, чтобы температура головки повысилась до ~ 11 К (~ 10 К для H_2). При этой температуре D_2 (или H_2) становится пластичным.

4. Включают электродвигатель, который через винтовую передачу приводит в движение плунжер (поз. 8, рис. 4), вытесняющий дейтерий через экструзионное сопло.

5. Из сопла экструдированный цилиндр твёрдого D_2 (H_2) подаётся внутрь полый свинцовой оболочки (поз. 1). Оператор управляет работой двигателя, контролируя процесс экструзии и заполнения оболочки дейтерием с помощью ПЗС-камеры, которая фиксирует момент появления стержня из нижней части свинцовой оболочки мишени.

6. Производится операция отрезания верхней (над свинцовой оболочкой) и нижней (под свинцовой оболочкой) частей экструдированного D_2 -стержня. Для этого используются две пары вольфрамовых проволок диаметром 0,1 мм, одна из которых расположена непосредственно над свинцовой оболочкой, другая — под нижним её концом (поз. 3, 4, рис. 4).

7. Вращением диска мишень передвигается к узлу формирования торцов криогенного ядра (поз. 4, рис. 3), где специальный механизм сдавливает концы дейтериевого стержня по направлению к центру мишени.

8. При следующем вращении диска готовая КТМ перемещается в узел контроля качества (поз. 5, рис. 3). Методы контроля качества ядра описаны далее.

9. Вращением диска КТМ подводится в соответствии с её качеством либо к узлу ввода КТМ в модуль доставки (поз. 6, рис. 3), либо к узлу ввода в накопитель отбракованных мишеней (поз. 7).

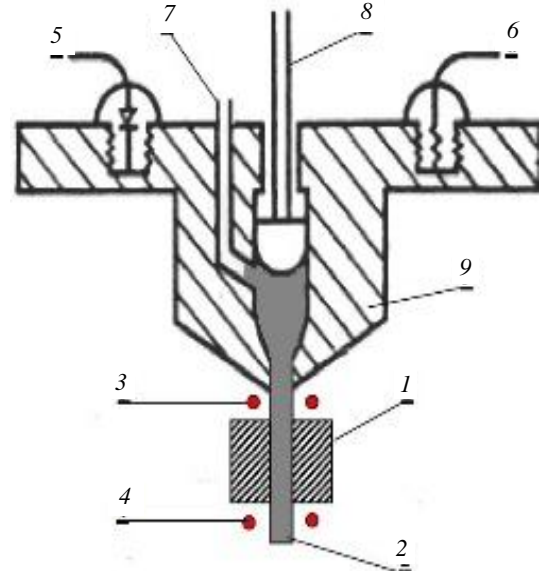


Рис. 4. Схема экструзионной головки: 1 — свинцовая оболочка; 2 — твёрдородный цилиндр; 3 и 4 — верхняя и нижняя пара отрезающих проволок; 5 — датчик температуры; 6 — нагреватель; 7 — канал подачи газообразного водорода (дейтерия); 8 — плунжер; 9 — медная экструзионная головка

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МИШЕНЕЙ (СКМ)

КТМ может использоваться в эксперименте только в случае соответствия её параметров техническим требованиям. Поэтому КТМ должна как минимум дважды пройти контроль качества: непосредственно после изготовления (дефекты изготовления) и непосредственно перед моментом облучения (дефекты, приобретаемые при доставке).

Возможные типы дефектов КТМ схематически показаны на рис. 5. Мы предполагаем, что все требования по химической чистоте материалов и геометрии внешнего свинцового цилиндра выполняются на более ранних стадиях подготовки КТМ. Таким образом, задачей контроля является анализ внутреннего состояния криогенного ядра мишени и его торцов, а также проверка отсутствия повреждений внешней свинцовой оболочки, которые могут возникнуть во время изготовления КТМ.

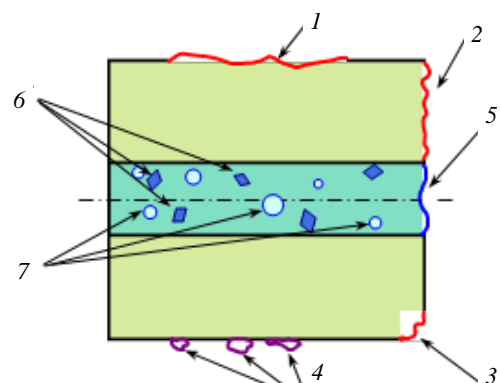


Рис. 5. Возможные типы дефектов КТМ: цилиндрическая оболочка: 1 — повреждена внешняя поверхность, 2 — повреждены торцы, 3 — замяты кромки, 4 — посторонние частицы на поверхности; криогенное ядро: 5 — деформированы торцы, 6 — крупные кристаллиты или трещины внутри, 7 — включения газовых пузырьков (внешняя цилиндрическая оболочка Pb (■), твёрдый H_2 или D_2 (■))

Все операции с КТМ должны проводиться при криогенной температуре, соответствующей температуре изготовления криогенного ядра (10—11 К). Это значит, что контроль должен осуществляться дистанционными, оптическими методами. На рис. 6 показана принципиальная схема системы контроля мишени (СКМ), предназначенная для обнаружения и анализа дефектов, показанных на рис. 5.

Контроль торцов криогенного ядра и свинцовой оболочки осуществляется в отражённом свете [37]. Источниками света являются некогерентные осветители (поз. 5, рис. 6) с конденсорами (поз. 4). Приемники света — ПЗС-камеры (поз. 7) с дистанционно управляемыми объективами (поз. 6). Исполнительные механизмы управления объективов показаны на рис. 6, в, поз. 8.

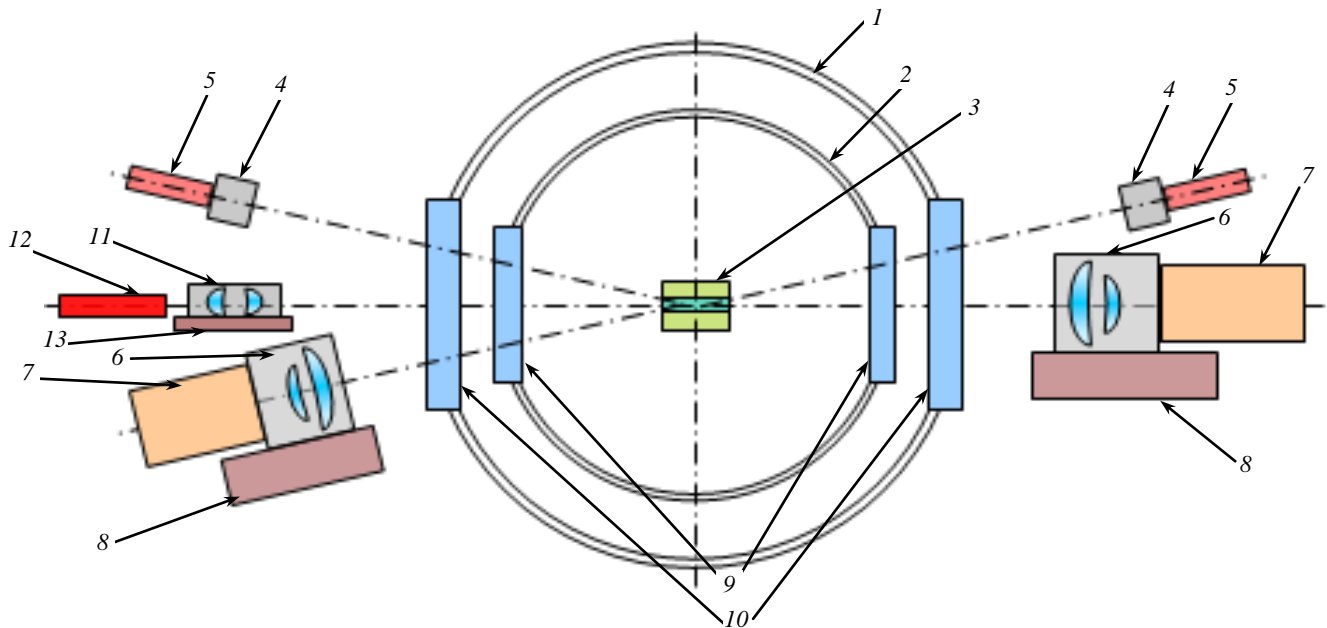


Рис. 6. Подсистема контроля мишени: 1 — внешняя стенка; 2 — внутренняя стенка; 3 — мишень; 4 — конденсор осветителя; 5 — некогерентный осветитель (лампа или светодиод); 6 — объектив; 7 — ПЗС-камера; 8 — привод фокусировки объектива; 9 — внутренние окна камеры; 10 — внешние окна камеры; 11 — телескоп; 12 — лазер (лазерный диод); 13 — блок управления телескопом

Для контроля внутреннего состояния криогенного ядра используется одна из ПЗС-камер (поз. 7, рис. 6). В качестве лазера подсветки (поз. 12) может быть использован полупроводниковый одномодовый или He—Ne-лазер (длина волны 0,6—0,67 мкм) с телескопом (поз. 11). Устройство настройки и сканирования телескопа (поз. 13) позволяет изменять его фокусное расстояние и проводить сканирование в плоскости нормальной оси мишени.

С помощью такой системы легко сфокусировать излучение лазера в узкий гауссовский пучок с диаметром перетяжки каустики в зависимости от апертуры контроля от нескольких десятков микрон до нескольких микрон. Проходя через ядро КТМ, такой пучок будет испытывать рассеяние на неоднородностях, которые могут оказаться в криогенном ядре мишени. В этом случае на выходе из ядра распределение интенсивности в пучке будет искажено, что может быть зарегистрировано ПЗС-камерой.

Характер искажения зависит от типа рассеяния. Рассмотрим процесс рассеяния света в криогенном ядре мишени более подробно. Ослабление светового луча при распространении его в мутной среде описывается простой формулой

$$I = I_0 e^{-hx}, \quad (1)$$

где I_0 и I — интенсивность входного и выходного пучка соответственно; h — коэффициент экстинкции. Если размеры неоднородностей много меньше длины волны света, то этот случай соответствует рассеянию Рэлея. Считая, что неоднородности — это включения газовой фазы (показатель преломления $n \approx 1$) внутри ядра твёрдого водорода (для твёрдого H_2 $n = 1,14$), и воспользовавшись формулой Рэлея [37], мы обнаружим, что интенсивность рассеянного света будет не более $(10^{-3}—10^{-5})I_0$, значит коэффициент экстинкции h будет мал. Это приведёт лишь к незначительному искажению выходного пучка.

При размерах неоднородностей порядка длины волны света преобладающим становится рассеяние Ми — тип рассеяния, связанный, в основном, с дифракционными явлениями. Рассчитать параметры этого типа рассеяния и связать их с геометрией рассеивающих центров аналитически довольно сложно. Можно лишь утверждать, что интенсивность рассеянного света будет возрастать с увеличением размеров и концентрации рассеивающих центров, т.е. коэффициент экстинкции h будет увеличиваться. Индикатриса рассеяния также будет изменяться, приобретая всё более ярко выраженное направление вперёд. В этом случае распределение интенсивности на выходе может сильно отличаться от гауссовского. До определённого размера рассеивающих центров оно будет достаточно гладким, без мелкомасштабных неоднородностей. Пороговый масштаб размеров рассеивающих центров близок к длине волны света.

При больших размерах объёмных неоднородностей рассеяние будет всё больше определяться не только дифракционными эффектами, но и просто геометрией хода лучей по объёму ядра (рис. 7). Изображение будет насыщено мелкомасштабными неоднородностями типа спекл-структуры, а каких-либо регулярных особенностей уже не будет видно. Здесь мы предполагаем, что объёмные рассеиватели распределены по объёму ядра и ориентированы случайным образом.

Нами был проведён прямой расчёт прохождения луча света через случайно ориентированные в пространстве поверхности раздела фаз (модель «снега» из твёрдого водорода). Полученные данные показали, что если $N = 5$ (N — число границ раздела, которые пересёк луч на своём пути), то вероятность выходного луча попасть в телесный угол 10° очень мала ($\sim 10^{-12}$) — и это несмотря на то, что показатель преломления твёрдого водорода не сильно отличается от единицы.

Таким образом, предлагаемая оптическая схема позволяет анализировать состояние ядра КТМ, в том числе определять качество его торцов, наличие включений и неоднородностей в объёме, проводить оценку их количества, распределения и размеров. Такая же система потребуется для контроля качества КТМ перед моментом её облучения.

ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ КАЧЕСТВА КРИОГЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ

Для реализации эксперимента LAPLAS необходимо не только изготовить цилиндрическую КТМ хорошего качества, но и доставить её в центр экспериментальной вакуумной камеры с последующим позиционированием КТМ относительно оси облучающего ионного пучка. Нарушение качества мишени при её доставке и позиционировании рассматривается как разрушение мишени. При этом КТМ подвергается как тепловым, так и механическим нагрузкам.

Этап позиционирования мишени. Данный этап характеризуется тепловыми нагрузками на КТМ за счёт теплопритока излучением от стенок экспериментальной камеры на внешнюю поверхность мишени. Определяющими процессами являются:

- нагрев криогенного ядра выше тройной точки топливного вещества, что приведёт к его плавлению и вытеканию из внутренней полости цилиндрической оболочки КТМ;
- испарение торцов криогенного ядра, в результате чего может произойти как искажение формы самих торцов, так и потеря массы ядра.

Этап доставки мишени. Данный этап характеризуется механическими нагрузками на КТМ за счёт её взаимодействия с внутренней поверхностью элементов системы доставки (например, со стенками направляющих трубок). Определяющими процессами являются:

- механическое повреждение внешней боковой поверхности свинцовой оболочки, а также её торцов и кромок;
- сдвиг цилиндрического криогенного ядра вдоль оси свинцовой оболочки КТМ.

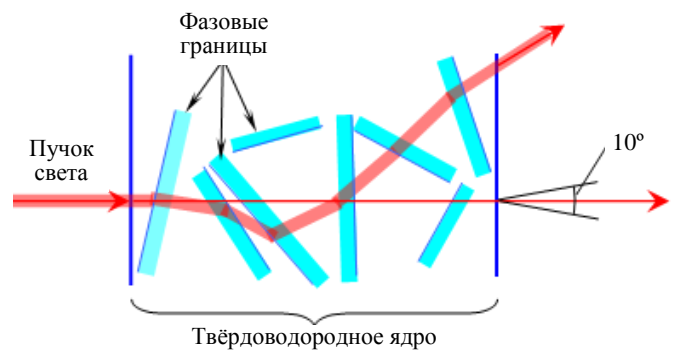


Рис. 7. Прохождение света через слой с объёмными неоднородностями (отражённые лучи не показаны)

В данном разделе проведён анализ источников разрушения мишени на различных стадиях манипулирования в СКС и даны рекомендации, позволяющие избежать потери качества отдельных элементов КТМ.

Моделирование процесса нагрева КТМ до тройной точки твёрдого H₂ (или D₂) при различных условиях теплообмена. Для первоначальной оценки характерного времени тепловых процессов проведём анализ, основанный на использовании числа Фурье (F), являющегося одним из критериев подобия нестационарных тепловых процессов. Число Фурье характеризует соотношение между скоростью изменения тепловых условий в окружающей среде и скоростью перестройки поля температуры внутри исследуемой системы (в нашем случае это криогенная мишень).

Число Фурье зависит от характерных размеров системы и коэффициента температуропроводности:

$$F = \frac{a\tau}{l^2}, \tag{2}$$

где l — характерный линейный размер системы; τ — характерное время изменения внешних условий; $a = \lambda/(C\rho)$ — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность; C — удельная теплоёмкость.

Параметр $\tau = l^2/a$ может рассматриваться как вполне характерный для данного теплового явления масштаб времени [38]. Мы провели расчёты времени τ для КТМ со следующими характерными линейными размерами: 2,1 мм — толщина стенки оболочки из металла (Au, Pb) и 0,4 мм — радиус ядра для водородного топлива. Результаты расчётов приведены в табл. 2 и 3. Очевидно, что наиболее быстро тепловые процессы протекают в золоте.

Т а б л и ц а 2. Характерное время τ (с) тепловых процессов для золота (Au) и свинца (Pb)

T, K	Pb	Au
4	$1,08298 \cdot 10^{-4}$	$9,10481 \cdot 10^{-6}$
5	$2,62740 \cdot 10^{-4}$	$1,5082 \cdot 10^{-5}$
6	$5,24652 \cdot 10^{-4}$	$1,98955 \cdot 10^{-5}$
7	$6,91719 \cdot 10^{-4}$	$3,37863 \cdot 10^{-5}$
8	$1,32000 \cdot 10^{-3}$	$4,73738 \cdot 10^{-5}$

Т а б л и ц а 3. Характерное время τ (с) тепловых процессов для изотопов водорода

T, K	DT	D	n-H ₂	p-H ₂
4	0,0025	0,01004	0,09794	$2,3323 \cdot 10^{-6}$
5	0,00599	0,00625	0,03769	$2,7365 \cdot 10^{-5}$
6	0,0054	0,00542	0,02172	$1,2211 \cdot 10^{-4}$
7	0,00642	0,00627	0,01909	$3,7993 \cdot 10^{-4}$
8	0,00685	0,00685	0,01716	0,0016
9	0,0125	0,01173	0,02032	0,00356
10	0,01785	0,01778	0,02365	0,00818
11	0,02929	0,02872	0,02965	0,01447
12	0,04377	0,04387	0,03577	0,02481
13	0,06098	0,06046	0,07901	0,05815
14	0,0824	0,08261		
15	0,1135	0,11389		
16	0,15548	0,15647		
17	0,21677	0,20887		
18	0,31152	0,2802		

Тепловые процессы в изотопах водорода протекают медленнее, чем в металлах (Au, Pb). Это означает, что оценки времени, полученные для металлической оболочки, являются «оценкой снизу», т.е. процесс нагрева топлива протекает не быстрее, чем процесс нагрева оболочки.

Проведём оценку скорости нагрева цилиндрической оболочки КТМ. Общий вид уравнения теплопроводности без внутренних источников записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T). \tag{3}$$

Проинтегрируем это уравнение по всему объёму:

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) dv = \iiint_V \text{div}(\lambda \text{grad} T) dv \tag{4}$$

и, используя теорему Гаусса—Остроградского, получим

$$\iiint_V \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) dv = \iint_S \lambda \operatorname{grad} T \overline{ds}. \quad (5)$$

По формуле Фурье для плотности теплового потока Q имеем

$$Q = -\lambda T$$

или окончательно

$$\frac{dT}{dt} = \frac{S}{V} \frac{1}{c\rho} Q,$$

где S — площадь поверхности цилиндра; V — объём цилиндра; c и ρ — теплоёмкость и плотность материала цилиндрической оболочки. Если теплоприток на мишень обусловлен только излучением от стенок экспериментальной камеры, то уравнение (6) примет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{S}{V} \frac{1}{c\rho} \sigma (\alpha T_c^4 - \beta T^4), \quad (6)$$

где α — коэффициент поглощения; β — коэффициент черноты; σ — постоянная Стефана—Больцмана; T_c — температура стенок камеры. Поскольку в нашем случае температура мишени существенно ниже температуры стенок камеры, то уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{S}{V} \frac{1}{c\rho} \alpha \sigma T_c^4. \quad (7)$$

Предположим теперь, что на части цилиндрической оболочки относительной площади S_i поддерживается температура T_0 . Это означает, что по мере нагрева КТМ тепловым излучением образуется дополнительный поток тепла, который для цилиндрической оболочки запишется в следующем виде [39]:

$$Q = 2\pi\lambda h(T_0 - T) / \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (7^*)$$

В этом случае уравнение (7) примет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{S}{Vc\rho} \left((1 - S_i) \alpha \sigma T_c^4 + \gamma \lambda S_i \frac{(T_0 - T)}{r_2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \right), \quad (8)$$

где γ — коэффициент, учитывающий степень неидеальности теплового контакта (при идеальном тепловом контакте $\gamma = 1$); h — длина цилиндра; r_1 — внутренний радиус цилиндра; r_2 — внешний радиус цилиндра.

Замечание. Отметим, что коэффициент γ характеризует величину контактного термического сопротивления и зависит от большого числа факторов, таких, например, как класс чистоты обработки поверхности контактирующих тел, наличие на них окисной или адсорбированной плёнки, начальная разность температур соприкасающихся тел, и других экспериментальных условий. Поскольку точное значение коэффициента γ можно установить только экспериментально, в проведённых далее расчётах величина γ варьировалась в широких пределах — от 1 до 0,01.

Оптимизация условий доставки и позиционирования с целью увеличения времени жизни криогенной мишени в теплой камере. Для расчёта процесса нагрева цилиндрической оболочки (уравнения (7), (8)) было создано программное обеспечение CDEGRADATION.

Были проведены расчёты нагрева свинцовой и золотой цилиндрических оболочек со следующими параметрами: внешний радиус 2,5 мм, длина 5 мм, внутренний радиус 0,4 мм. Начальная температура оболочки $T_i = 4,2$ К, что соответствует минимально возможной температуре КТМ. Результаты расчётов показали, что в случае только теплопритока излучением от стенок камеры (уравнение (7), $T_c = 300$ К)

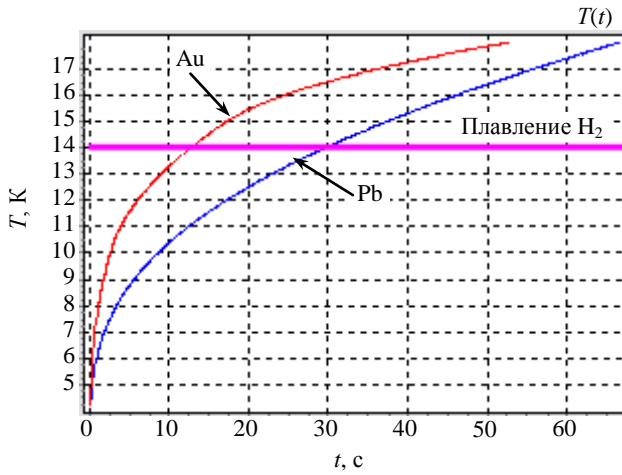


Рис. 8. Зависимость температуры цилиндрической оболочки от времени для случая её нагрева только за счёт теплового излучения стенок камеры ($T_c = 300\text{ K}$)

свинцовая оболочка нагревается от 4,2 до 14 К (напомним, что при $T = 13,96\text{ K}$ происходит плавление H_2) за время около 30 с, золотая — за время около 12 с (рис. 8).

Отметим, что в экспериментах LAPLAS будет проводиться облучение мишени, лежащей на специальном держателе устройства позиционирования. Это означает, что, кроме теплообмена излучением между КТМ и стенками вакуумной камеры, возникает дополнительный (контактный) теплообмен между КТМ и держателем. Примем также во внимание, что с момента доставки КТМ на держатель и до момента её облучения необходимо не только осуществить точное её позиционирование относительно оси облучения, но и проконтролировать качество криогенного ядра и торцов мишени (окончательный контроль).

Если держатель находится при комнатной температуре, то время, за которое необходимо провести все перечисленные манипуляции с мишенями, составит $\ll 1\text{ с}$ (уравнение (8)). Поэтому необходимо снизить тепловые нагрузки на мишень за счёт разработки специальных мер защиты.

Одним из способов является применение криогенного держателя. Оценим характерные времена нагрева свинцовой оболочки тепловым излучением стенок камеры в этом случае.

Предполагаемая форма мишенного гнезда (подложки), обеспечивающая устойчивость положения мишени и максимальный контакт между мишенью и держателем, представляет собой цилиндрическую канавку длиной, равной длине мишени h , и радиусом, равным внешнему радиусу мишени $R = r_2$. Варьируя глубину канавки d (см. схему на рис. 9, а, б), можно менять площадь контакта от $S_t = 50\%$ ($d = R$) и ниже. Проведённые испытания показали, что мишень устойчиво лежит в гнезде цилиндрической канавки глубиной $d = 1\text{ мм}$ ($S_t = 19\%$).

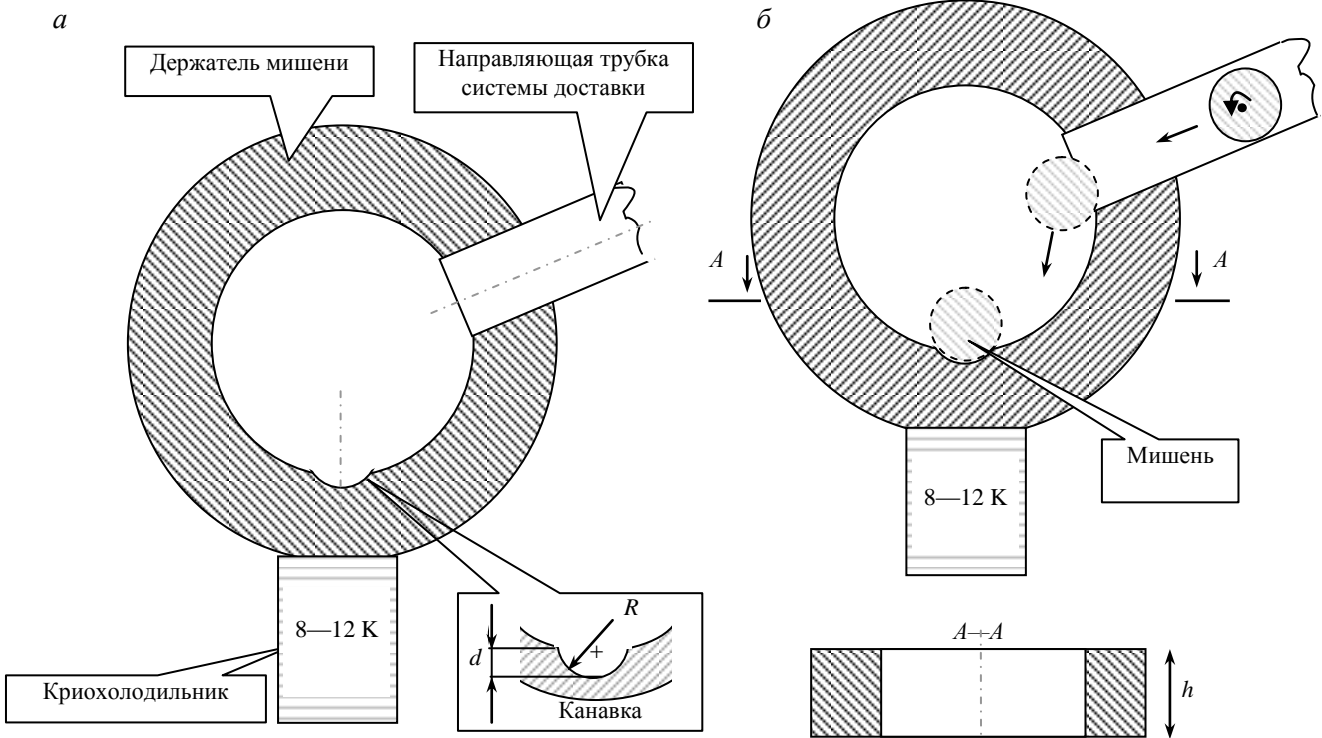


Рис. 9. Цилиндрическая канавка для фиксации мишени в держателе: схема держателя с канавкой радиусом R , равным внешнему радиусу мишени, длиной h , равной длине мишени и глубиной d (а); схема доставки мишени в держатель (б)

На рис. 10 приведены результаты расчётов нагрева свинцовой оболочки за счёт излучения стенок камеры ($T_c = 300$ К) в отсутствие (1) и при наличии (2) контакта с холодной подложкой (криогенный держатель). Из расчётов следует, что свинцовая оболочка с начальной температурой 4,2 К приобретает температуру держателя 8 К за время менее 50 мс, после чего температура оболочки не меняется.

На рис. 11 показана зависимость температуры оболочек из свинца и золота от времени при различной температуре держателя. Оболочка находится внутри вакуумной камеры с температурой стенок $T_c = 300$ К. Температура держателя в этих расчётах варьировалась от 8 до 12 К. Начальная температура мишени принималась равной 4,2 К. Все расчётные кривые имеют сходный вид — за относительно короткое время температура мишени достигает температуры «насыщения», незначительно превосходящей температуру подложки, и далее практически не растёт. Величину этой температуры легко оценить. Для этого воспользуемся уравнением (8), в котором приравняем нулю производную по времени (т.е. левую часть уравнения):

$$T_n = T_0 + \frac{\alpha \sigma T_c^4}{\gamma \lambda} r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \frac{(1 - S_i)}{S_i}. \quad (9)$$

В табл. 4 приведены характерные времена установления температурного равновесия между свинцовой оболочкой с начальной температурой $T_i = 4,2$ К и подложкой (держателем) для указанных условий (см. подпись к рис. 11). Здесь T_0 — температура подложки; T_n — соответствующая температура «насыщения»; τ — время достижения T_n .

Т а б л и ц а 4. Стабилизация температуры оболочки ($T_i = 4,2$ К) при различных значениях температуры держателя

$T_0, \text{ К}$	$T_n, \text{ К}$	$\tau, \text{ с}$
8	8,016	0,212
9	9,019	0,3
10	10,024	0,47
11	11,025	0,62
12	12,024	0,863

В приведённых расчётах начальная температура свинцовой оболочки T_i принималась равной минимально возможной температуре мишени $T_i = 4,2$ К. Это означает, что в сценарий формирования и доставки должна быть включена дополнительная ступень, связанная с охлаждением КТМ. Кроме того, внутренняя поверхность элементов системы доставки КТМ от модуля формирования до криогенного держателя должна также охлаждаться до температуры 4,2 К, а это потребует большого расхода одного из дорогих компонентов — жидкого гелия.

Более перспективным представляется вариант, когда величина T_i близка к той температуре, при которой КТМ была получена в модуле формирования. Как для метода экструзии, так и для метода *in situ* оптимальной является температура 10—11 К. Поэтому в следующей серии расчётов положим начальную температуру свинцовой оболочки равной $T_i = 11$ К. Отметим также, что мишень устойчиво располагается на держателе, если величина относительной площади контакта лежит в диапазоне $S_i = 20$ —50%

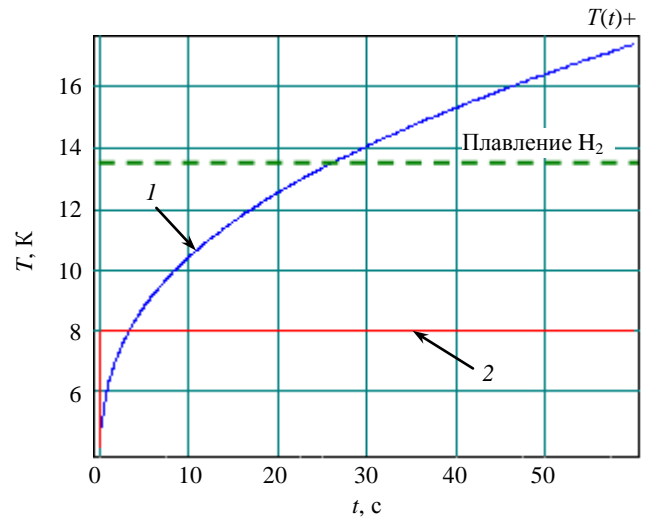


Рис. 10. Результаты расчётов нагрева свинцовой оболочки за счёт излучения стенок камеры: 1 — в отсутствие и 2 — при наличии контакта с криогенным держателем. Расчётные параметры: $T_c = 300$ К, $T_0 = 8$ К, $T_i = 4,2$ К

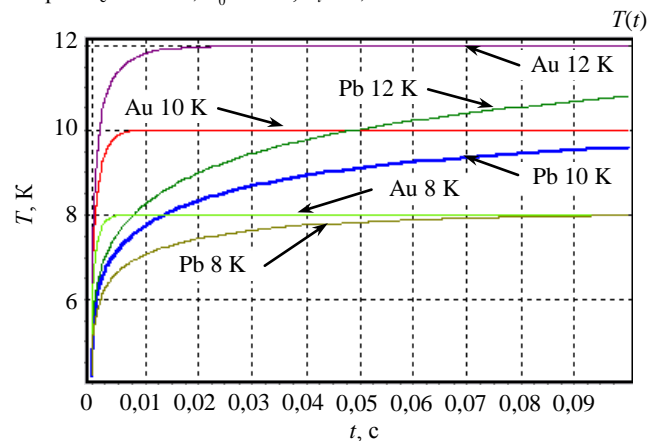


Рис. 11. Нагрев цилиндрической оболочки, расположенной в камере на криогенном держателе. Расчётные параметры: цилиндрическая оболочка из Pb или Au, диаметр 5, высота 5, толщина 2,1 мм; $T_c = 300$ К; $\alpha = 10\%$; $T_0 = 8, 9, 10, 11, 12$ К; $\gamma = 50\%$, $S_i = 10\%$, $T_i = 4,2$ К

(определено экспериментально). Возьмём минимальное значение $S_i = 20\%$. Согласно техническим требованиям температура мишени T_{ct} в момент облучения не должна превышать температуру тройной точки T_{tp} для соответствующего изотопа водорода. Минимальное значение T_{ct} составляет 4,2 К. Тогда для случая криогенного ядра из водорода можем записать $T_{tp} = 13,96 \text{ К} > T_{ct} \geq 4,2 \text{ К}$, для случая ядра из дейтерия $T_{tp} = 18,65 \text{ К} > T_{ct} \geq 4,2 \text{ К}$. Учитывая сказанное, температуру криогенного держателя примем равной $T_0 = 5, 8, 10, 13, 18 \text{ К}$. Значение коэффициента γ положим равным 50%.

Полученные результаты, представленные на рис. 12, с очевидностью свидетельствуют, что даже при $T_i = 11 \text{ К}$ температура свинцовой оболочки достигает температуры насыщения T_n , близкой к температуре держателя T_0 , за относительно короткое время τ , которое не превышает 1 с. Таким образом, используя криогенный держатель, мы можем не только защитить КТМ от теплового излучения стенок камеры, но фиксировать температуру КТМ в пределах, установленных техническими требованиями.

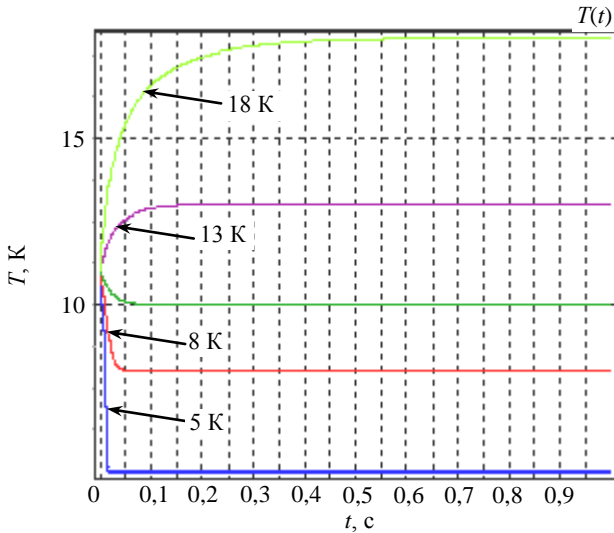


Рис. 12. Стабилизация температуры цилиндрической оболочки, расположенной в камере на криогенном держателе. Расчётные параметры: цилиндрическая оболочка из Pb, диаметр 5, высота 5, толщина 2,1 мм; $T_c = 300 \text{ К}$; $\alpha = 10\%$; $T_0 = 5, 8, 10, 13, 18 \text{ К}$; $S_i = 20\%$; $\gamma = 50\%$; $T_i = 11 \text{ К}$

Предполагается, что охлаждение держателя до требуемой температуры будет осуществляться с помощью стандартного криохолодильника. Следует подчеркнуть, что если при температуре 10—11 К мощность типового криохолодильника составляет ~10 Вт, то в интервале температуры $T_0 = 4,2—5 \text{ К}$ она на порядок меньше. Поэтому чем ниже температура, тем меньше должна быть масса держателя и элементов, находящихся с ним в контакте (например, защитных экранов), в противном случае невозможно обеспечить необходимую температуру КТМ.

Нам осталось выяснить роль коэффициента γ , учитывающего степень неидеальности теплового контакта. Ранее уже отмечалось, что его точное значение можно установить только экспериментально. Поэтому на данной стадии исследований мы можем лишь варьировать γ в широких пределах значений. Поскольку при $\gamma = 50\%$ величина τ , определяющая время достижения температуры «насыщения», не превышает 1 с, то при проведении расчётов изменение коэффициента γ берем в сторону его уменьшения: 30, 10, 5%. Полученные результаты представлены на рис. 13 и в табл. 5. Хорошо видно, что даже в случае $\gamma = 5\%$ тепловое равновесие между оболочкой и подложкой (при минимальном значении $S_i = 20\%$) достигается достаточно быстро — за время менее 20 с, а температура насыщения достаточно близка температуре подложки, т.е. $T_n \sim T = 18 \text{ К}$ (см. табл. 5). В этих

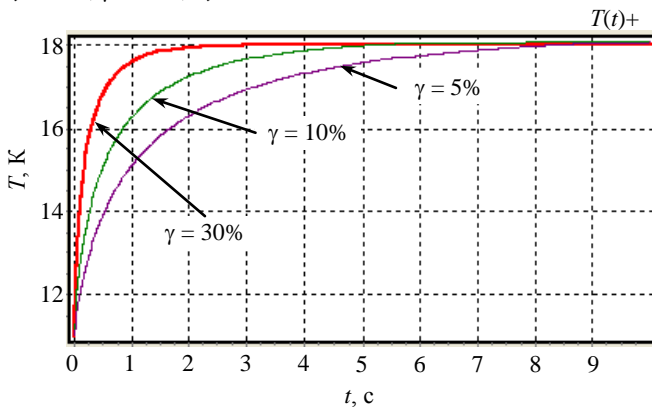


Рис. 13. Влияние неидеальности теплового контакта на нагрев цилиндрической оболочки. Расчётные параметры: цилиндрическая оболочка из Pb, диаметр 5, высота 5, толщина 2,1 мм расположена в камере на криогенном держателе; $T_c = 300 \text{ К}$; $\alpha = 10\%$; $T_0 = 18 \text{ К}$; $S_i = 20\%$; $\gamma = 5; 10; 30\%$; $T_i = 11 \text{ К}$

расчётах начальная температура свинцовой оболочки $T_i = 11 \text{ К}$.

Т а б л и ц а 5. Стабилизация температуры оболочки при различных значениях коэффициента γ

$\gamma, \%$	$T_n, \text{ К}$	$\tau, \text{ с}$
5	18,238	19,3
10	18,12	10,02
30	18,04	2,8

Таким образом, проведённые исследования показывают следующее.

В процессе позиционирования КТМ в центре экспериментальной камеры необходимо выполнение следующих условий:

— КТМ должна лежать на криогенном держателе. Температура держателя T_0 составляет $5 \text{ К} \leq T_0 < 13 \text{ К}$ для H_2 и $5 \text{ К} \leq T_0 < 18 \text{ К}$ для D_2 , что позволяет обеспечить необходимую температуру мишени в момент облучения в полном соответствии с техническими требованиями. Ещё раз отметим, что охлаждение до 5 К возможно только для очень маленькой массы держателя;

— начальная температура КТМ T_i должна быть близка к той температуре, при которой мишень была получена в модуле формирования, т.е. $T_i = 10\text{—}11 \text{ К}$ (оптимальная температура как для метода экструзии, так и для метода *in situ*).

Эффективность теплообмена между держателем и лежащей на нём КТМ зависит от относительной площади контакта S_i и коэффициента γ . Расчёты показали следующее:

— эффективный теплообмен между поверхностью КТМ и держателем обеспечивается даже при очень малых γ (5%) и малой величине относительной площади контакта (20%);

— точное значение коэффициента γ подлежит экспериментальному определению, т.е. необходимо проведение дополнительных исследований в этой области. Подчеркнём, что коэффициент γ тем выше, чем выше класс обработки поверхностей и их чистота.

Применение криогенного держателя позволяет фиксировать температуру КТМ в пределах, установленных техническими требованиями, и защитить мишень от теплового излучения стенок камеры.

Отметим, что проведённый анализ не учитывает процессов разрушения КТМ за счёт нагрева и испарения торцевых поверхностей криогенного ядра. При доставке и позиционировании КТМ в центре экспериментальной камеры вещество с поверхности торцов криогенного ядра может испаряться неоднородно, что приведёт к искажению формы торцов. Возможная эволюция формы торцов показана на рис. 14. Данную проблему может решить применение специального экрана, защищающего торцы мишени от теплового излучения стенок экспериментальной камеры. Экран убирается непосредственно перед моментом облучения КТМ.

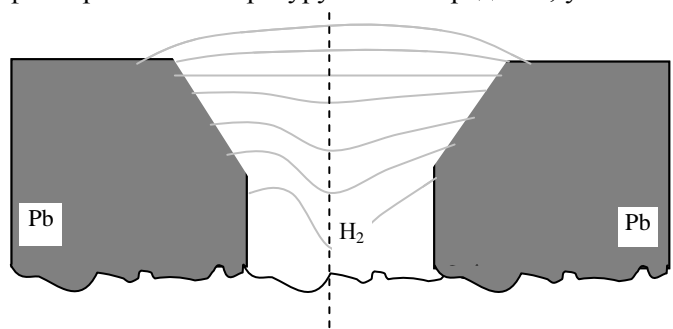


Рис. 14. Схема возможной эволюции формы торцевых поверхностей криогенного ядра мишени с учётом разности скоростей испарения на оси и на периферии

Защита поверхности мишени от механического разрушения. Результаты экспериментов. Материал ядра КТМ — твёрдый водород непрочен и хрупок, но он защищён от прямых механических повреждений внешней свинцовой оболочкой. Наиболее уязвимое место криогенного ядра — его торцы. Чтобы избежать механического повреждения торцов ядра, необходимо применять специальные меры, например, помещать мишень внутрь защитной трубки.

При транспортировке КТМ взаимодействует с внутренней поверхностью элементов системы доставки, вследствие чего может возникнуть смещение криогенного ядра относительно оси свинцовой оболочки. Чтобы избежать нарушений качества мишени в данной ситуации, диаметр внутреннего отверстия свинцовой оболочки должен быть несколько увеличен на краях за счёт специальной проточки (фаски), причём криогенное ядро формируется так, чтобы плотно прилегать к фаске оболочки. Такая форма торцов показана на рис. 14.

Материал внешней цилиндрической оболочки — свинец имеет предел текучести $\sigma_T = 0,49\text{—}0,98 \text{ н/м}^2$, что на полтора-два порядка меньше, чем для обычных конструкционных материалов (сталь, сплавы алюминия, медь и др.). Поэтому основная проблема при транспортировке незакреплённой КТМ между модулями СКС связана именно с вероятностью механического нарушения качества поверхности свинцовой оболочки.

Отметим, что проблема механического повреждения поверхности КТМ связана, в основном, с применением гравитационной доставки. В системе электромагнитной доставки предполагается использова-

ние специальной капсулы-носителя (или сабота), внутри которой размещается КТМ. Капсула обеспечивает не только транспорт мишени, но и её защиту от механических повреждений и перегрева.

Для того чтобы изучить особенности механического повреждения свинцовой оболочки в процессе гравитационной доставки, было изготовлено несколько образцов, представляющих собой свинцовые оболочки внешним диаметром 5 мм, внутренним диаметром 1 мм и высотой 5 мм. Были проведены следующие эксперименты:

— реализация трения-скольжения. Цилиндрический образец скользит по медной трубке круглого сечения с внутренним диаметром 6 мм и длиной 50 см. Трубка изогнута таким образом, что её верхний конец имеет вертикальную ось симметрии, а ось нижнего конца составляет 45° к горизонту (рис. 15, а);

— реализация трения-качения. Цилиндрический образец скатывается по медной трубке длиной 50 см, имеющей в сечении квадрат со стороной 6 мм. Эта трубка располагается под углом 45° к горизонту (рис. 15, б).

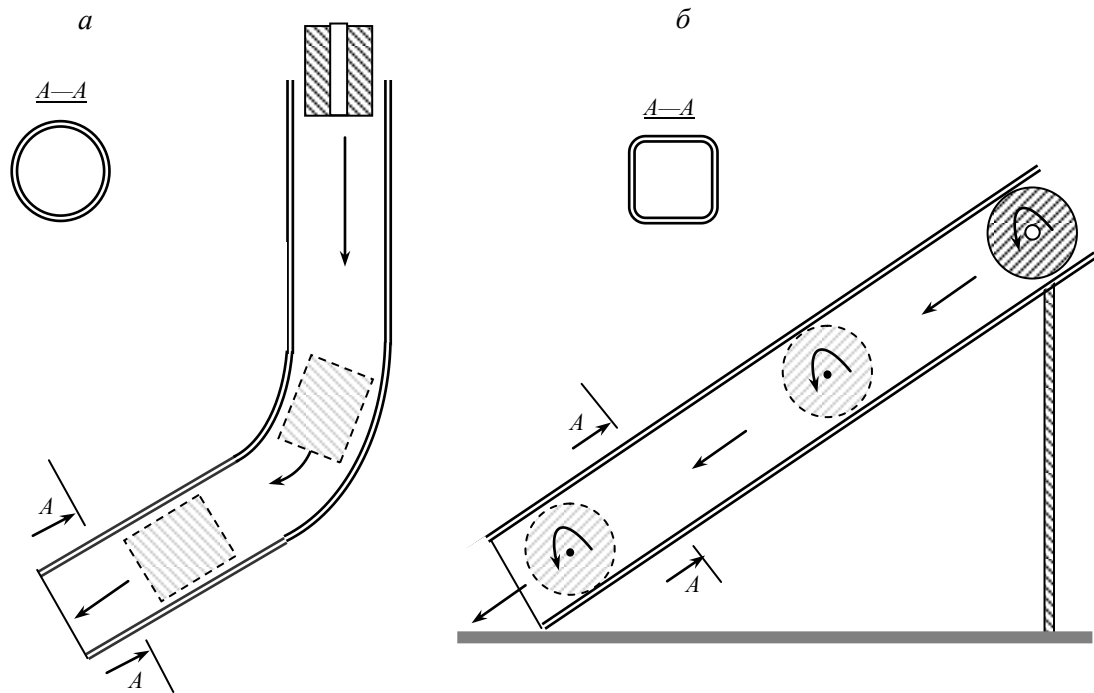
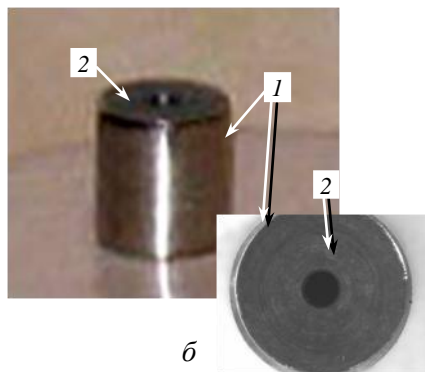
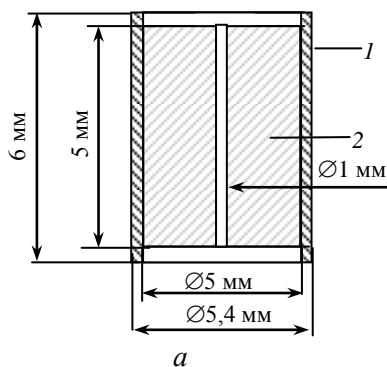


Рис. 15. Схема опытов по пробросу свинцовой оболочки через трубки разного сечения: а — скольжение оболочки в трубке круглого сечения; б — качение оболочки в трубке квадратного сечения

Образцы исследовались под микроскопом до и после движения внутри трубок. Исследования показали, что в процессе транспортировки боковая поверхность, острые края и торцы свинцовой оболочки портятся при соприкосновении с поверхностью направляющей трубки: на поверхности оболочки появляются шероховатости, риски, вмятины и углубления.

Одним из эффективных средств защиты является тонкостенная трубка из нержавеющей стали, внутри которой и помещается цилиндрическая оболочка из свинца.



при которой и помещается цилиндрическая оболочка из свинца. На рис. 16, а, б показана схема расположения свинцовой оболочки внутри защитной трубки, а также фотография такой сборки, изготовленной и испытанной в экспериментах. В данной геометрии от механических воздействий защищена не только боковая поверхность свинцовой оболочки, но и её торцы, а также торцы криоген-

Рис. 16. Схема расположения свинцовой оболочки внутри защитной трубки из нержавеющей стали (а), фотография цилиндрической оболочки (б): 1 — трубка из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм; 2 — свинцовая оболочка

ного ядра мишени, поскольку длина защитной трубки на 1 мм больше, чем длина мишени. Отметим, что та же трубка из нержавеющей стали используется как формирующий элемент (пресс-форма) и на этапе изготовления свинцовой оболочки.

Испытания, проведённые при комнатной (300 К) и криогенной (77 К) температуре, показали, что даже при сильных механических воздействиях (вибрации, удары) сборка свинцовой оболочки с трубкой из нержавеющей стали сохраняет свою конфигурацию.

В качестве средства защиты может также быть полезна капсула из политетрафторэтилена (тефлона). Широко известны такие свойства тефлона, как хорошая антифрикционная способность, которая проявляется в широком диапазоне рабочей температуры — от 5 до 300 К. Поскольку тефлон обладает наименьшим коэффициентом трения среди твёрдых материалов, применение такой капсулы позволяет не только защитить поверхность мишени от механического повреждения, но и минимизировать тепло, выделяющееся за счёт трения движущейся мишени о стенки направляющих трубок. Размещение цилиндрической мишени внутри капсулы из тефлона показано на рис. 17. Дополнительным средством защиты может служить покрытие внутренней поверхности направляющих каналов тефлоном.

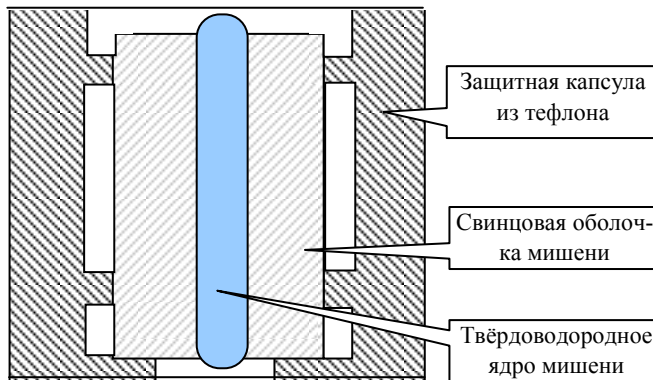


Рис. 17. Капсула из тефлона как элемент защиты поверхности свинцовой оболочки и торцов твёрдородного ядра от механического разрушения

Применение эффекта квантовой левитации высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) — ещё один перспективный способ защиты поверхности КТМ, который был предложен и испытан в ФИАН [40—42]. Для его реализации внешняя поверхность КТМ покрывается слоем ВТСП (рис. 18), а направляющая трубка инжектора снабжается системой из постоянных магнитов (так называемая PMG-система, или permanent magnets guideway system), (рис. 19, 20). Эффект квантовой левитации ВТСП позволяет защитить поверхность КТМ от повреждений, а криогенное топливное ядро — от негативного воздействия тепловых нагрузок, возникающих вследствие трения поверхности КТМ о поверхность направляющей трубки. Этот подход также позволяет снизить риски, связанные с расклиниванием мишени внутри направляющей трубки инжектора.

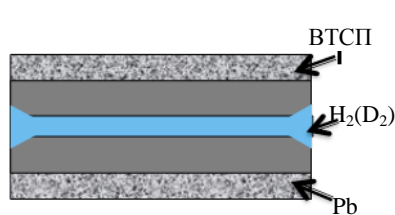


Рис. 18. КТМ с внешним защитным слоем из ВТСП

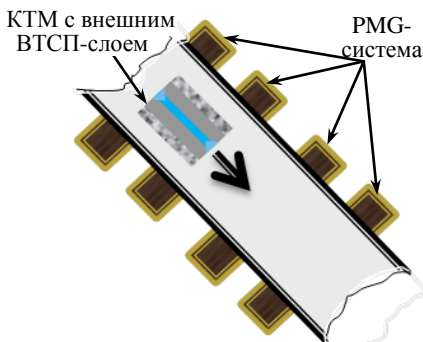


Рис. 19. Движение КТМ с внешним ВТСП-слоем под действием гравитации в магнитном поле PMG, контакт между поверхностью мишени и направляющей трубкой отсутствует



Рис. 20. ВТСП-образец выстраивается внутри PMG-системы вдоль линии минимальной магнитной индукции. ВТСП-образец приготовлен в ФИАН на основе керамики YBa_2Cu_3O ($T_c \sim 91$ К, $H_c \sim 5,7$ Тл при 0 К)

ПРОБЛЕМЫ ДОСТАВКИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КРИОГЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ

Основные требования к системе доставки. После того, как мишень изготовлена и проверена системой контроля, она, в случае успешного прохождения проверки, должна доставляться в центр экспериментальной камеры. Характерный размер экспериментальной камеры составляет ~3 м. Следовательно, мишень нужно переместить на расстояние ~1,5 м внутри камеры.

При выборе способа доставки следует руководствоваться следующими соображениями:

- на всех этапах подготовки мишени к эксперименту LAPLAS осуществляется работа с незакреплённой мишенью;
- система доставки должна работать при требуемом разрежении в экспериментальной камере;
- система доставки должна проектироваться так, чтобы минимизировать механические воздействия на мишень (удары, точечное давление, трение и др.);
- внутри системы доставки мишень транспортируется в ориентации, удобной для применения конкретного способа доставки. Однако подаваться из системы доставки на держатель мишень должна в горизонтальной ориентации, обеспечивающей возможность её облучения в геометрии эксперимента LAPLAS. Следовательно, в конструкции системы доставки должен быть предусмотрен узел поворота оси мишени;
- наконец, в процессе доставки КТМ не должна нагреться выше температуры тройной точки топлива, в противном случае криогенное топливное ядро разрушается. При выборе температуры внутренней поверхности элементов системы доставки существуют три варианта:
 - комнатная температура (300 К) — самый экономичный уровень температуры;
 - азотная температура (70—77 К) — экономичный уровень температуры;
 - водородно-гелиевая температура (4,2—20 К) — наименее экономичный уровень температуры.

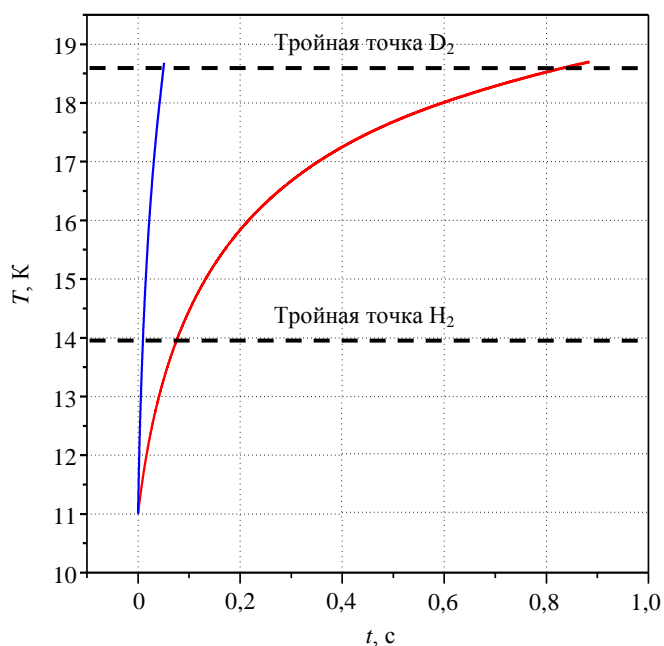


Рис. 21. Нагрев мишени (оболочка из свинца) при её движении внутри транспортного канала. Начальная температура мишени 11 К, температура канала 70 К (—) и 20 К (—)

кинетическая энергия $E_k \sim 1$ кДж. Падение мишени на держатель в данном случае эквивалентно выстрелу в него из револьвера (кинетическая энергия летящей пули составляет 2—5 кДж) и приведёт как к разрушению самой пули (КТМ), так и элементов держателя.

Дальнейшие расчёты показали, что даже при температуре стенок 20 К время нагрева мишени до тройной точки чрезвычайно мало (см. рис. 21, красная линия): оно составляет около 0,07 с (нагрев до тройной точки H_2) и менее 0,9 с (нагрев до тройной точки D_2). В том случае, если температура КТМ и температура стенок равны, нагрев мишени в процессе доставки практически не происходит (только вследствие трения). Поскольку температура изготовления КТМ составляет 10—11 К, необходимо, чтобы температура внутренней поверхности транспортного канала находилась на уровне 10—11 К или ниже.

Принимая во внимание перечисленные условия, можно рекомендовать два способа доставки криогенных мишеней типа LAPLAS: электромагнитный и гравитационный. Далее перечислим характерные особенности каждого способа доставки.

На рис. 21 (синяя линия) показана тепловая история КТМ (оболочка из свинца) в процессе её движения по транспортному каналу с температурой стенок 70 К. Расчёты показали, что при азотном уровне охлаждения стенок канала мишень нагревается от 11 К до тройной точки D_2 за время менее 5 мс, до тройной точки H_2 — за время менее 1 мс.

Поскольку нижняя граница времени доставки (для гравитационного подхода) составляет $\sim 0,55$ с, что соответствует времени свободного падения мишени с высоты 1,5 м, то даже азотный уровень температуры (а тем более комнатная температура) не позволяет сохранить КТМ от теплового разрушения.

В отличие от гравитационного, электромагнитный способ доставки в принципе позволяет транспортировать мишень на расстояние 1,5 м за 1 мс. Однако в этом случае средняя скорость движения мишени соответствует 1500 м/с, её

Электромагнитная система доставки. Данный способ доставки работает при любом расположении МИС относительно камеры. Принципиальная схема системы электромагнитной доставки цилиндрической КТМ, заключённой внутри специальной капсулы-носителя, показана на рис. 22.

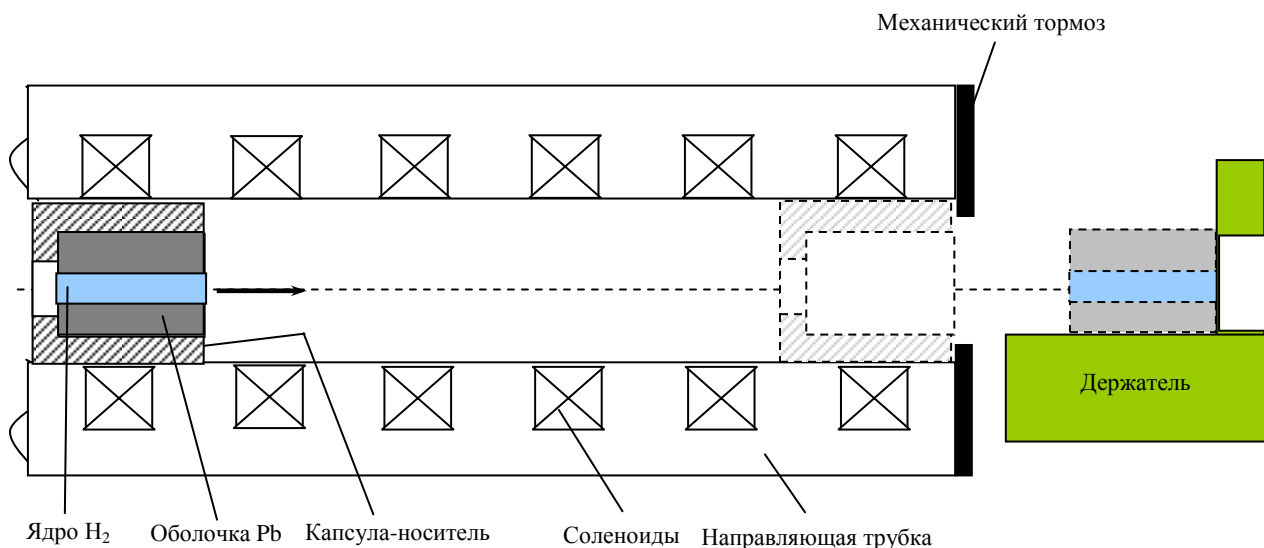


Рис. 22. Принципиальная схема системы электромагнитной доставки мишени (мишень находится внутри ферромагнитной капсулы-носителя)

Капсула-носитель ускоряется в электромагнитном поле катушек системы доставки. На выходе из направляющей трубки капсула тормозится механически (или с помощью электромагнитного поля), а КТМ по инерции движется дальше и попадает на держатель, укрепленный в центре экспериментальной камеры.

Принципы, положенные в основу электромагнитной доставки мишени предполагают, что капсула-носитель изготовлена из магнитоактивного материала, эффективно взаимодействующего с электромагнитным полем соленоидов. Подходящим материалом для капсулы в этом случае является, например, магнитомягкий ферромагнетик с начальной магнитной проницаемостью ~ 250 и плотностью $\sim 8 \text{ г/см}^3$. Вес капсулы составляет $\sim 1 \text{ г}$ (для геометрии, показанной на рис. 23).

Процесс доставки капсулы с КТМ должен происходить при температуре $10\text{--}11 \text{ К}$. Возможность ускорения цилиндрической ферромагнитной капсулы в поле соленоидов при температуре $4,2\text{--}77 \text{ К}$ впервые была изучена в серии экспериментов, проведённых в ФИАН [43, 44].

Эти исследования показали, что магнитная проницаемость μ цилиндрической капсулы, изготовленной из магнитомягкого железа типа АРМКО при температуре $T = 10 \text{ К}$ составляет $\mu \sim 100$, т.е. в 2,5 раза ниже значения магнитной проницаемости этого материала при $T = 300 \text{ К}$ ($\mu = 250$). Однако этого вполне достаточно, чтобы обеспечить эффективную работу системы доставки. Поэтому на основании проведённых исследований можно рекомендовать магнитомягкое железо как материал, пригодный для работы при $10\text{--}11 \text{ К}$. Для минимизации энергетических затрат на транспортировку КТМ масса капсулы должна быть минимальна при заданных габаритах.

Перспективным материалом для капсулы является магнетодиэлектрик. В этом материале ферромагнитные частицы (ферромагнитная фаза плотностью $7\text{--}8 \text{ г/см}^3$) распределены по объёму полимерной матрицы (диэлектрическая фаза плотностью $1\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$). Магнитная проницаемость магнетодиэлек-

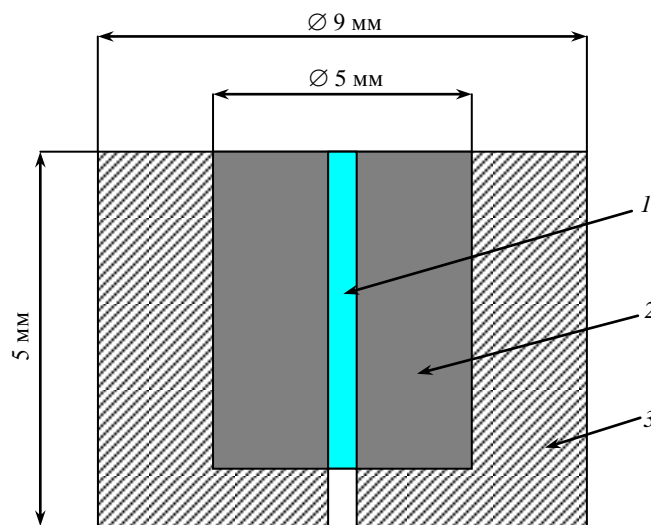


Рис. 23. Цилиндрическая криогенная мишень, расположенная внутри капсулы-носителя из магнитоактивного материала: 1 — криогенное ядро; 2 — свинцовая оболочка; 3 — капсула-носитель

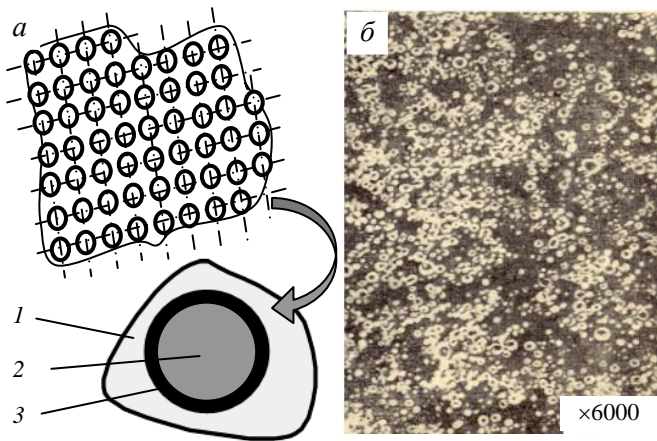


Рис. 24. Магнитодиэлектрик для изготовления капсулы: *a* — структура магнитодиэлектрика: 1 — диэлектрическая матрица, 2 — ферромагнитная частица, 3 — изолирующее покрытие; *б* — рентгеновская фотография внутренней структуры магнитодиэлектрика на основе карбонильного железа

триков может изменяться в диапазоне 3—10. Применение этого материала вместо сплошного ферромагнетика позволяет при сохранении магнитной активности капсулы и её габаритов снизить вес капсулы примерно в 3 раза. На рис. 24, взятом из работы [45], схематически показана структура магнитодиэлектрика. Ферромагнитная фаза определяет наличие магнитных свойств, а диэлектрическая фаза предотвращает контактирование ферромагнитных частиц (или феррочастиц) между собой во избежание потерь на вихревые токи, а также выполняет роль связующего частиц в монолитную механически прочную массу.

Совокупность соленоидов обеспечивает доставку цилиндрических КТМ, заключённых внутри движущейся капсулы, имеющей определённый магнитный момент (см. рис. 22). Каждый следующий шаг ускорения капсулы с КТМ обеспечивается с помощью прямоугольного импульса тока, запускающего определённый соленоид в работу в тот момент, когда передняя плоскость капсулы находится на расстоянии радиуса от входа в этот соленоид. Как было показано в [44], ускоряющая сила F , действующая на капсулу-носитель, определяется следующим выражением:

$$F(z) = -\frac{P\mu_0}{4\left[N + (1-N)/\mu_E\right]^2} (I\omega)^2 \Phi(z, l_s, l, r) \quad (10)$$

где $\mu_E = \frac{\mu^P}{1 + (\mu^P - 1)N}$; P — относительный объём магнитоактивных добавок в полимерной матрице;

μ — коэффициент магнитной проницаемости добавок; N — форм-фактор, зависящий от формы капсулы-носителя мишени; μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость в вакууме; I — амплитуда тока; ω — число витков соленоида; функционал Φ зависит от геометрии соленоида и капсулы, а также от их взаимного размещения; l_s, l — длина соленоида и капсулы соответственно; r — внутренний радиус соленоида; z — координата положения центра масс капсулы внутри соленоида.

Соотношение (10) справедливо для сплошного ферромагнитного материала ($P = 1$), а также для магнитодиэлектрика с количеством магнитоактивных добавок в диапазоне $0,2 \leq P \leq 0,8$, т.е. в том случае, когда коэффициент магнитной проницаемости материала μ_m может быть задан уравнением Лихтеннекера [46] $\mu_m = \mu^P$.

Анализ соотношения (10) показал [43], что в оптимальном случае материал цилиндрической капсулы-носителя должен состоять из магнитодиэлектрика с количеством магнитоактивных добавок в диапазоне $P = 0,6—0,8$.

В настоящее время многие элементы системы электромагнитной доставки уже отработаны в приложении к сферическим криогенным мишеням, расположенным внутри цилиндрической ферромагнитной капсулы-носителя [43, 44, 47—49]).

Преимущества электромагнитного подхода:

- система доставки работоспособна при любой геометрии расположения МИС относительно камеры;
- использование капсулы-носителя обеспечивает не только доставку мишени, но и её защиту от механических повреждений и перегрева;
- подход применим для мишеней, изготовленных из любого материала;
- возможность тонкой регулировки скорости доставки с целью минимизации механических нагрузок на мишень;
- система доставки работает при любом уровне разрежения и исключает вероятность загрязнения камеры посторонним газом.

Недостатки электромагнитного подхода: менее экономичный, чем гравитационный, поскольку требует создания сложной системы электромагнитов, а также создания капсулы-носителя.

Гравитационная система доставки. Отметим, что многолетний опыт работы ФИАН в области гравитационной доставки незакреплённых криогенных сферических мишеней [47, 49] показал, что гравитационный способ эффективен для углов, составляющих не менее 15° относительно горизонтальной оси. Поэтому гравитационный способ работает только тогда, когда МИС расположен в верхней части камеры.

Рассмотрим две конкретные схемы реализации гравитационного подхода при доставке незакреплённых цилиндрических КТМ на держатель, заранее размещённый в центре экспериментальной камеры: свободное падение мишени и движение по направляющим.

Свободное падение КТМ. Если модуль изготовления и сборки мишеней (МИС) размещён вверху экспериментальной камеры, возможно применить гравитационный способ доставки, основанный на свободном падении КТМ. В этом случае реализуется минимальное время доставки.

На рис. 25 представлена условная схема данной системы доставки. КТМ (1) из модуля изготовления и сборки (МИС) направляется в приёмную воронку (2) вакуумного шлюза (3). После открытия нижнего люка шлюза КТМ падает в приёмную воронку (4) держателя, тормозится в канале (5), а затем попадает на держатель (6), где и фиксируется в необходимом положении.

Преимущества данной схемы: малое время доставки, простота конструкции, малый телесный угол и минимальное пространство в экспериментальной камере, которое занимают элементы системы.

Гравитационное перемещение мишени по направляющим. Данный подход реализуется, если угол расположения МИС на камере варьируется в пределах $15^\circ < \alpha < 90^\circ$. Отличие данного подхода заключается в том, что КТМ перемещается под действием сил гравитации вдоль направляющих. При этом возможны два типа движения КТМ: скольжение или качение.

На рис. 26 показан вариант со скольжением КТМ вдоль направляющей трубки. Трубка (4) изготовлена из тефлона для уменьшения трения. Снаружи она защищена стандартной гофрированной трубкой из нержавеющей стали (5). Такая конструкция является достаточно гибкой. В случае необходимости дополнительного охлаждения она может состоять из нескольких коаксиальных труб, между которыми прокачивается холодный газообразный гелий.

Преимущества системы: стабильная траектория мишени, малое время доставки мишени (не более 2—3 с), стабильная ориентация мишени на всём протяжении её траектории, сравнительная простота конструкции, не требуется большого пространства для размещения системы в экспериментальной камере.

Для снижения влияния сил трения лучше применять направляющие трубки, в которых мишень может катиться, а не скользить. Для организации такого движения подходит, например, трубчатая спираль с углом захода $45\text{—}15^\circ$, выполненная из полой трубки

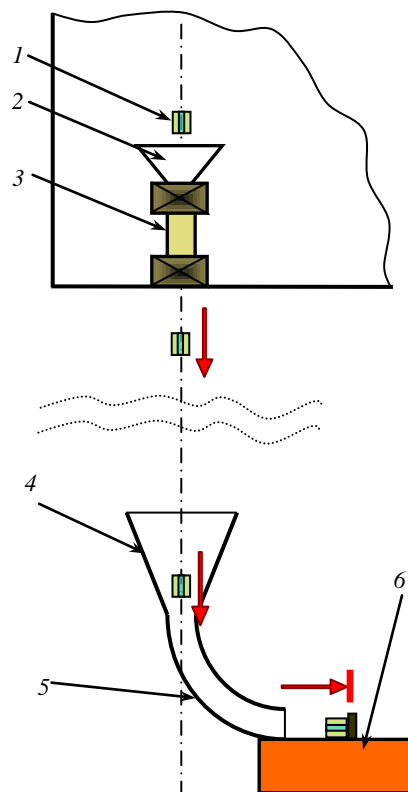


Рис. 25. Схема системы доставки мишени в свободном падении: 1 — мишень; 2 — приёмная воронка шлюза; 3 — вакуумный шлюз; 4 — приёмная воронка держателя; 5 — канал торможения; 6 — держатель мишени

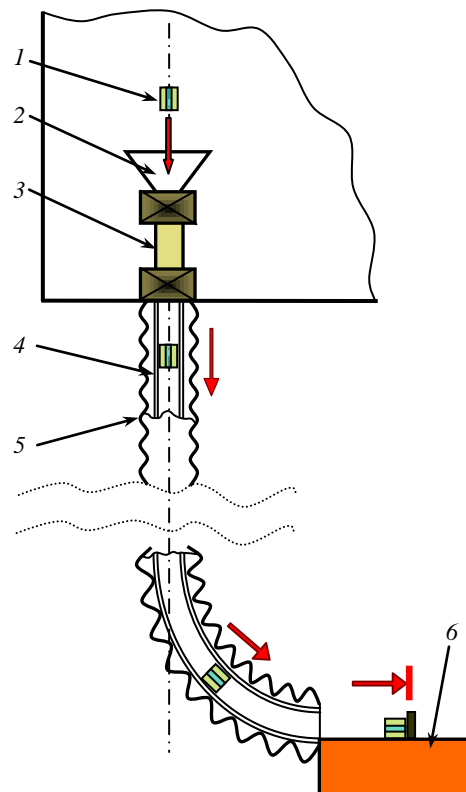


Рис. 26. Схема доставки мишени с помощью направляющей трубки: 1 — мишень; 2 — приёмная воронка шлюза; 3 — вакуумный шлюз; 4 — внутренняя тефлоновая трубка; 5 — защитная трубка; 6 — держатель мишени

квадратного сечения. Для снижения скорости движения мишени перед выходом на держатель можно применить механическое либо электромагнитное торможение.

Как в первом (свободное падение), так и во втором (движение по направляющим) случаях требуются дополнительные исследования процесса торможения КТМ с учётом возможного нагрева при снижении её скорости.

Макетные испытания гравитационного способа доставки цилиндрических мишеней. Проведена серия экспериментов на специально созданном макете, общий вид которого показан на рис. 27. Во всех исследованных процессах основной силой, движущей цилиндрическую оболочку, являлась сила гравитации. Испытания были проведены при нормальных условиях (300 К, 1 атм.).

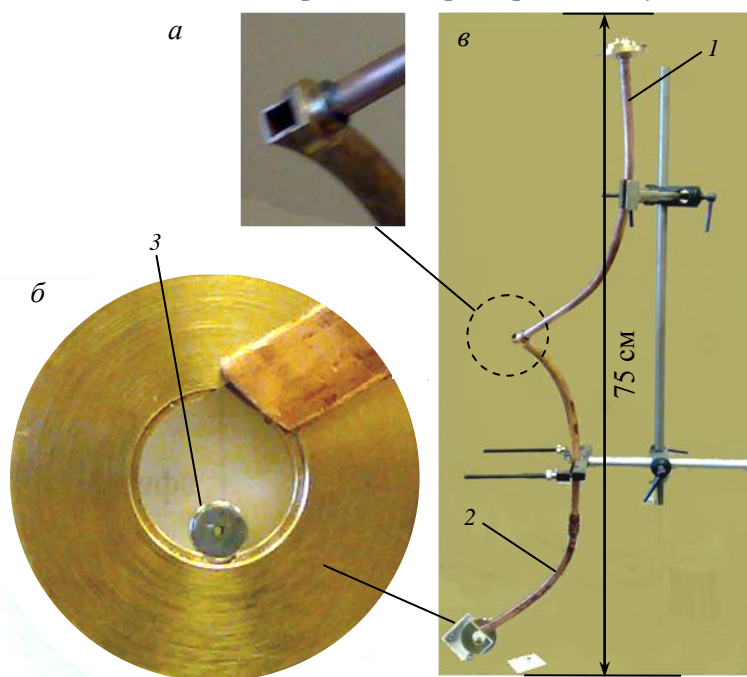


Рис. 27. Макет транспортного узла: *а* — узел смены оси вращения мишени в процессе её транспортировки по направляющей трубке; *б* — цилиндрическая оболочка из свинца внутри приёмного устройства, выполненного из латуни; *3* — цилиндрическая оболочка из свинца; *в* — общий вид макета: *1* — медная трубка с круглым сечением и внутренним диаметром 6 мм; *2* — медная трубка с квадратным сечением 6×6 мм

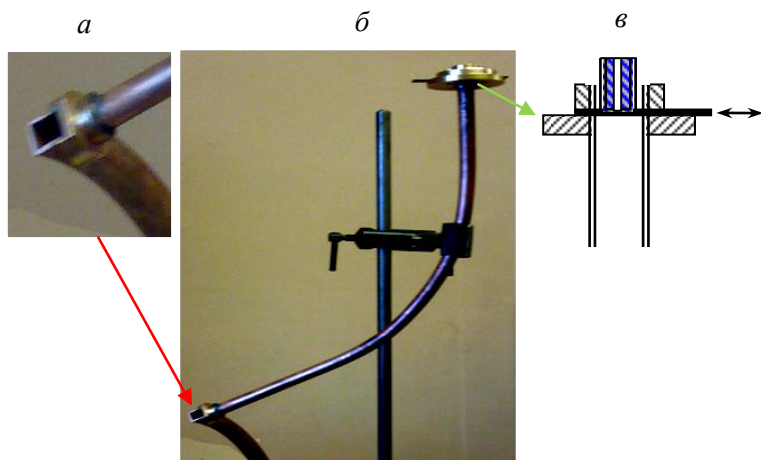


Рис. 28. Макет из двух направляющих трубок: *а* — общий вид; *б* — область сочленения трубок с круглым и квадратным сечениями; *в* — схема устройства ввода цилиндрической оболочки в направляющую трубку круглого сечения

Было изготовлено несколько свинцовых цилиндрических оболочек с внешним диаметром 5 мм, внутренним диаметром 1 мм и длиной 5 мм. Оболочки помещались внутрь тонкостенной трубки из нержавеющей стали (внутренний диаметр 5 мм, длина 6 мм, толщина 0,2 мм) так, как это показано на рис. 16, *а*. Трубка из нержавеющей стали играла роль элемента, защищающего внешнюю поверхность оболочки от механических повреждений. Фотография такой оболочки показана на рис. 16, *б*. Экспериментально исследованы следующие процессы:

— движение мишени по направляющей трубке: скольжение внутри трубки круглого сечения, качение внутри трубки квадратного сечения. Эксперименты показали, что оба способа передвижения оболочки пригодны при условии, что поверхность свинцовой цилиндрической оболочки защищена от механических повреждений;

— поворот оси цилиндрической оболочки на 90°. Для реализации данных испытаний был собран макет, состоящий из двух трубок: медной трубки круглого сечения с внутренним диаметром 6 мм и медной трубки, имеющей в сечении квадрат со стороной 6 мм. Трубка круглого сечения была изогнута таким образом, что верхний её конец имел вертикальную ось симметрии, нижний конец имел ось под углом ~45° к горизонту (рис. 28, *а*). Нижний конец круглой трубки сочленялся с трубкой квадратного сечения так, как это показано на рис. 28, *б*. Схема ввода цилиндрической оболочки в трубку круглого сечения показана на рис. 28, *в*. Эксперименты показали, что данный подход позволяет добиться требуемого поворота оси цилиндрической оболочки;

— загрузка мишени на держатель позиционера. В данных экспериментах был использован держатель специализированной формы, схема которого показана на рис. 9, а. Общий вид держателя показан на рис. 27, б. В боковой стенке держателя было сделано отверстие для загрузки оболочки из направляющей трубки квадратного сечения.

Испытания показали, что для надёжной подачи и размещения оболочки в гнезде приёмного устройства необходимо реализовать следующее: торможение оболочки на выходе из направляющей трубки и применение экрана-ограничителя, который убирается перед самым моментом облучения. Роль экрана: предохранение мишени от соскальзывания с приёмного устройства в момент подачи, защита торцов криогенного ядра от испарения в течение всего времени пребывания мишени в камере вплоть до момента облучения.

На рис. 29 показана фотография держателя в сборке с экраном-ограничителем, выполненным из плексигласа. Окончательный выбор способа доставки будет сделан после уточнения конструкции экспериментальной камеры, а также проведения экспериментов с реальными мишенями при рабочих (криогенных) температурах.

Позиционирование мишени в центре экспериментальной вакуумной камеры. До момента облучения ось КТМ должна быть точно съюстирована относительно оси облучающего её пучка. С этой целью КТМ располагается в цилиндрической канавке криогенного держателя (см. рис. 9, а). Тем самым обеспечиваются фиксация КТМ в пространстве относительно держателя и хороший теплообмен.

Держатель находится в тепловом контакте с пяткой системы охлаждения. Для его охлаждения может быть использована, например, стандартная система типа SRDK—408D, работающая на основе замкнутого цикла Клиффорда—МакМагона.

Следует, однако, иметь в виду, что имеющиеся на рынке стандартные криохолодильники имеют при температуре 4—5 К сравнительно небольшую тепловую мощность 1—2 Вт. При повышении температуры тепловая мощность возрастает, достигая при 10—11 К значения $W \sim 10$ Вт, при 18 К — $W \sim 17$ Вт (данные указаны для SRDK—408D). Поэтому чем ниже температура, тем меньше должна быть масса держателя и находящихся на нём дополнительных устройств (позиционеры, поворотные механизмы и пр.). Таким образом, выбор конструкции и массы держателя, а также его температура должны быть строго оптимизированы в соответствии с типом криохолодильника.

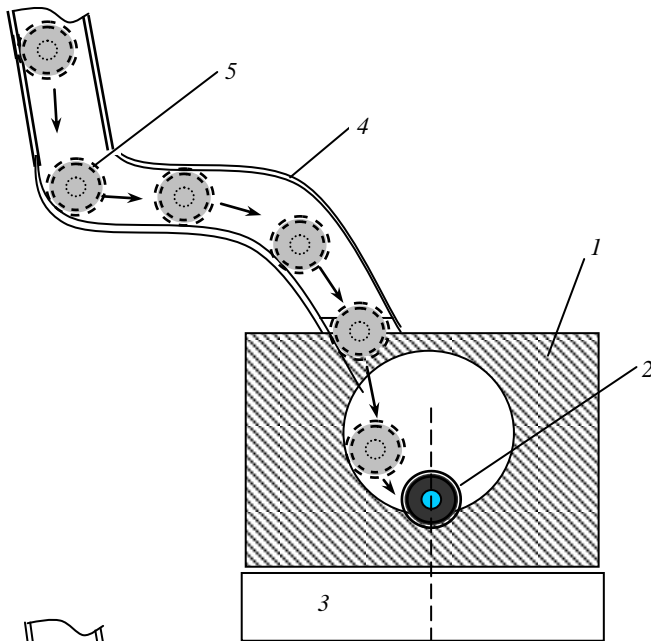
Предполагается, что в реальном эксперименте в КТМ с помощью пучка тяжелых ионов будет вводиться несколько десятков килоджоулей энергии. При этом КТМ и близлежащие конструкционные элементы превращаются в плазму и пары. Поэтому желательно, чтобы разрушаемая часть конструкции держателя КТМ была простой, дешёвой и легко заменяемой. Кроме того, держатель мишени должен конструироваться так, чтобы не допустить разрушения деталей криохолодильника ударной волной, возникающей при выстреле.

Серьёзная проблема состоит также в том, что пары свинца и других веществ после выстрела будут осаждаться на стенках экспериментальной камеры и элементах конструкции внутри неё. Если экспериментальная камера является сферой диаметром 3 м, то нетрудно подсчитать, что после каждого выстрела на поверхности камеры будет осаждаться слой свинца толщиной около 3 нм (напомним, что масса КТМ около 1 г). За 100 выстрелов слой свинца увеличится до 0,3 мкм. Такое «покрытие» неизбежно нарушит работу незащищённых оптических, механических и электронных узлов, находящихся внутри камеры. Особенно критичны в этом смысле система доставки КТМ и элементы конструкции держателя и криохолодильника, так как они находятся в непосредственной близости от КТМ. Защита этих элементов может быть реализована, например, в виде специальных экранов, а также перемещения критических элементов перед выстрелом на заданное расстояние от КТМ.



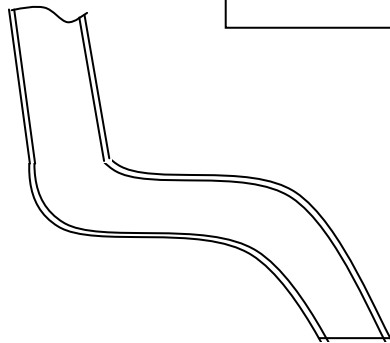
Рис. 29. Экран-ограничитель из плексигласа, укрепленный на держателе с мишенью

На рис. 30 показана одна из возможных схем работы с КТМ в экспериментальной камере. Для того чтобы предохранить элементы системы доставки от разрушения, держатель после загрузки в него КТМ



a

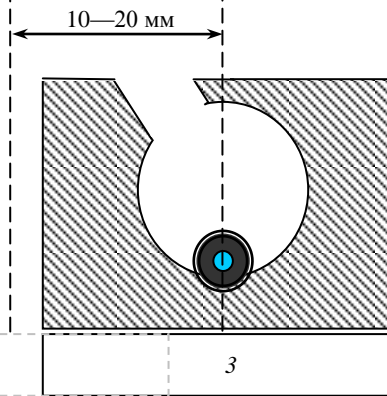
передвигается на безопасное расстояние (см. рис. 30, б), и только после этого осуществляются тонкая юстировка положения КТМ и её облучение. На рис. 31 показан один из возможных подходов (принципиальная схема держателя), обеспечивающих последовательное облучение нескольких КТМ без замены держателя между выстрелами.



б

Устройство позиционирования криогенной мишени (УПКМ). Поскольку КТМ имеет цилиндрическую симметрию, для её однозначного размещения в пространстве достаточно пяти степеней свободы. На рис. 32 показаны установочные координаты КТМ.

Рис. 30. Возможная схема работы с мишенью в экспериментальной камере: *a* — держатель в положении приёма мишени из системы доставки; *б* — держатель в положении позиционирования мишени и её облучения: 1 — держатель; 2 — мишень; 3 — пятка криохолодильника; 4 — направляющая трубка системы доставки; 5 — позиции мишени в процессе доставки (вариант — качение)



УПКМ должно обеспечивать размещение КТМ в заданной точке пространства и заданную ориентацию её оси с необходимой точностью. Требования к точности позиционирования КТМ близки к тем, которые обычно требуются в установках инерциального термоядерного синтеза, а именно: 10 мкм — линейная точность, 10 мин — угловая точность.

Размещение в зоне криогенных температур каких-либо юстировочных механизмов крайне нежелательно из следующих соображений:

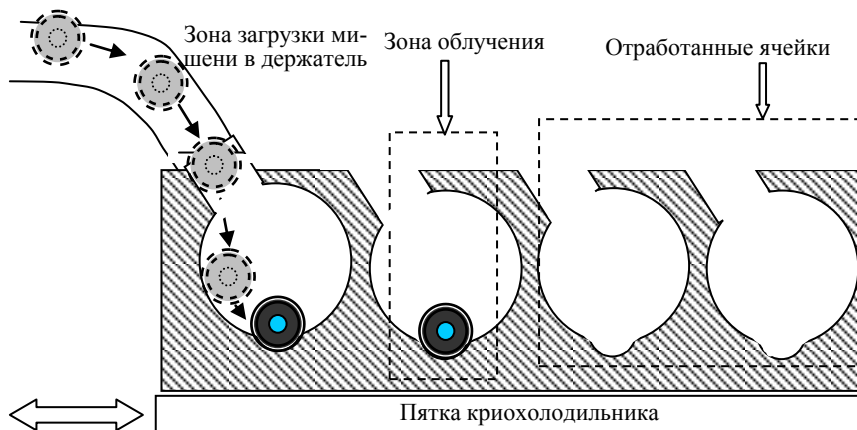


Рис. 31. Принципиальная схема держателя, предназначенного для непрерывной подачи мишеней в зону облучения

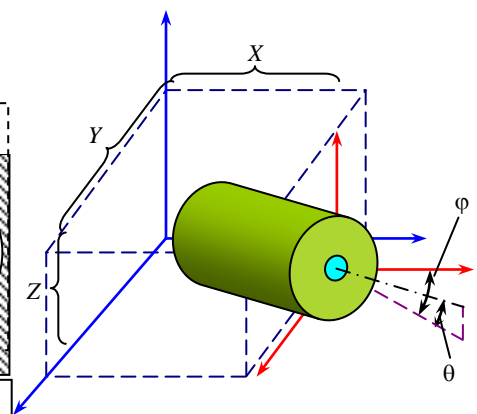


Рис. 32. Установочные координаты мишени: X, Y, Z — линейные координаты центра мишени в пространстве; θ, φ — угловые координаты оси мишени

— низкая тепловая мощность типовых криоохладильников, которая требует минимизации массы охлаждаемых элементов;

— разрушение КТМ и ближайших к ней элементов конструкции во время выстрела, распространение ударной волны и загрязнение близлежащих поверхностей материалом КТМ. Поэтому юстировочные элементы должны быть соответствующим образом защищены или должны заменяться перед каждым выстрелом, что приводит к дополнительному удорожанию системы;

— большинство материалов и стандартных механизмов, традиционно применяемых в узлах юстировки (пьезокерамика, магнитоотрицательные материалы, шаговые двигатели и др.), при криогенных температурах работают ненадёжно.

Поэтому нами предложено не размещать никаких дополнительных элементов и устройств на держателе КТМ [6, 7]. КТМ закрепляется на держателе в цилиндрической канавке с радиусом, соответствующим радиусу КТМ (рис. 33 и 22, а). Тем самым обеспечиваются фиксация мишени в пространстве относительно держателя и хороший теплообмен. Все необходимые пространственные подвижки осуществляются системой, расположенной в нижней части экспериментальной камеры.

Возможный вариант реализации такой системы представлен на рис. 34. Наиболее удобна в данном случае кинематическая схема, известная под названием «гексапод». Она обладает шестью степенями свободы, обеспечивает высокую точность позиционирования и может быть размещена в вакуумной камере. Такие устройства производятся промышленностью.

Отметим, что гексапод фирмы Ste Symetrie успешно испытан в системе доставки и позиционирования криогенных сферических мишеней в камере мощной лазерной установки LMJ [50]. Эти испытания показали реальную возможность применения гексапода для позиционирования с высокой точностью (линейная ± 5 мкм, угловая ± 50 мкрад) криогенной мишени, находящейся при температуре 18,2 К в центре экспериментальной вакуумной камеры диаметром 10 м. При этом обеспечивалось максимальное линейное X—Y—Z-перемещение мишени в центре камеры в пределах ± 50 мм.

Резюме. Проведённые исследования показали, что можно использовать два способа доставки КТМ от модуля формирования и сборки (МИС) к центру экспериментальной камеры: гравитационный и электромагнитный. Важно, что оба эти способа исключают возможность загрязнения объёма экспериментальной камеры посторонним газом. При этом гравитационный инжектор кажется наиболее экономичным средством, которое требует минимального времени доставки КТМ (1—2 с). Для предохранения внешней поверхности КТМ от механических повреждений вследствие трения предложено несколько способов: применение тонкостенной трубки из нержавеющей стали, покрытия из тефлона, а также внешнего ВТСП-покрытия КТМ.

КОНЦЕПЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

На основании проведённых исследований были определены технические требования к специализированной криогенной системе (СКС) и предложена концепция СКС, позволяющая минимизировать риски, возникающие при функционировании системы.

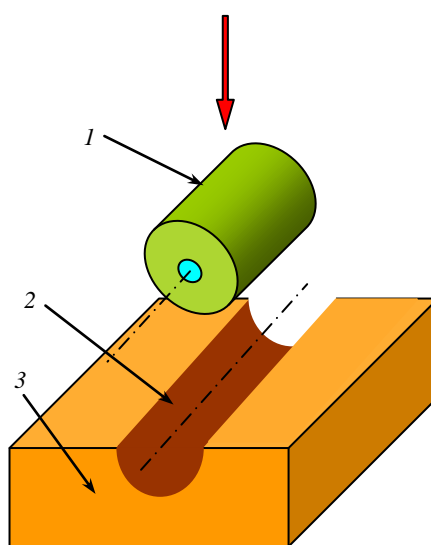


Рис. 33. Размещение КТМ на держателе: 1 — КТМ; 2 — цилиндрическая ответная выемка; 3 — корпус держателя КТМ

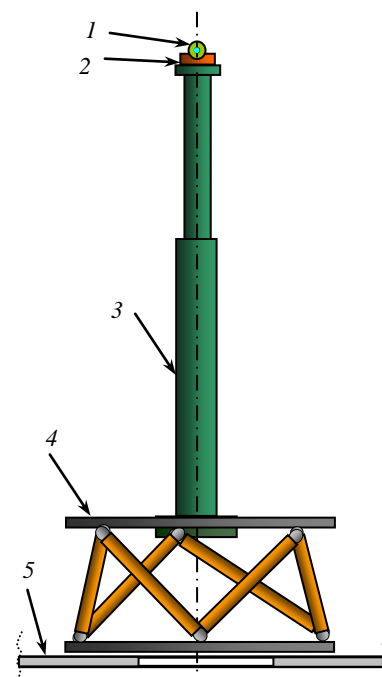


Рис. 34. Схема позиционирования мишени: 1 — мишень; 2 — держатель мишени; 3 — криоохладильник; 4 — механизм юстировки (гексапод); 5 — стенка экспериментальной камеры

СКС состоит из шести основных подсистем: МИС — модуль изготовления и сборки криогенной мишени; МДМ — модуль доставки криогенной мишени; ВТК — вакуумная тест-камера; УПКМ — устройство позиционирования криогенной мишени; САУ — система автоматизированного управления; ДОМ — дополнительное оборудование и материалы.

Назначение и технические требования к основным подсистемам СКС приведены в табл. 6. Особенности концепции СКС связаны с тем, что отдельные модули системы, работая совместно, обеспечивают реализацию замкнутого цикла по формированию криогенного топливного ядра, его сборке с внешней свинцовой оболочкой, доставке КТМ и её позиционированию в центре вакуумной экспериментальной камеры. Такой модульный подход позволяет минимизировать риски и их влияние на финальный результат, обеспечивает возможность независимой разработки отдельных модулей, а также их последующей модернизации. Все операции с КТМ в процессе их производства и доставки реализуются в автоматическом режиме.

Т а б л и ц а 6. Назначение и технические требования к основным подсистемам СКС

Подсистема и её назначение	Технические требования
МИС Изготовление криогенного ядра, диагностика его качества и сборка (сборка оболочки и капсулы (или трубки) называется сборочным элементом (СЭ)) со Pb-оболочкой КТМ — серия свинцовых оболочек изготавливается заранее в соответствии со спецификациями качества)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Гравитационная загрузка СЭ в мишенные гнёзда 2. Максимальное количество загружаемых СЭ 7 штук 3. Изготовление цилиндрического криогенного ядра методом in-situ или экструзии 4. Оптимальная температура криогенного ядра 10—11 К 5. Разрежение $\leq 10^{-3}$ торр 6. Сборка ядра со свинцовой оболочкой 7. Транспорт готовых мишеней: <ul style="list-style-type: none"> — в МДМ (если криоядро хорошего качества); — в накопитель отбракованных мишеней 8. Согласование по вакуумным условиям МИС и ВТК 9. Оптический контроль качества криогенного ядра с апертурой наблюдения $\geq 30^\circ$
МДМ Доставка готовой криогенной мишени от МИС в центр ВТК	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тип доставки: гравитационная или электромагнитная 2. Тефлоновое покрытие внутренней поверхности направляющих трубок (НТ) 3. Оптимальная температура внутренней поверхности НТ 10—11 К 4. Разрежение во внутреннем объёме НТ такое же, как в ВТК (10^{-6} торр) 5. Транспорт мишени на держатель, расположенный в центре ВТК <ul style="list-style-type: none"> — на расстояние 1500 мм — с частотой одна мишень в час 6. Торможение мишени перед её подачей на держатель 7. Поворот оси мишени в соответствии с геометрией облучения
ВТК Тестирование работы СКС и её подсистем	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность диагностики в реальном времени положения мишени, качества криогенного ядра, качества торцов свинцовой оболочки 2. Разрежение $\leq 10^{-6}$ торр 3. Температура стенок 300 К
УПКМ Позиционирование мишени, находящейся в центре ВТК	<ol style="list-style-type: none"> 1. Держатель мишени расположен в центре ВТК 2. Температура поверхности держателя ≤ 10—11 К 3. Ориентация оси КТМ: горизонтальная, вдоль оси облучения 4. Максимальное X—Y—Z-перемещение ± 50 мм 5. Точность позиционирования: линейная ≤ 10 мкм, угловая ≤ 10 мин 6. Система экранов: приём мишени на держатель, защита мишени от излучения стенок камеры, от действия ударной волны и паров Pb
САУ Контроль рабочих параметров и управление работой исполнительных механизмов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сбор, обработка и архивирование данных, управление исполнительными элементами 2. Пределы измерения: температуры 4,2—20 К; давления 760—10^{-6} торр 3. Режимы измерений: автоматический, ручной
ДОМ Вакуумирование, криостатирование, электро- и газоснабжение подсистем СКС	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обеспечение разрежения в СКС и ВТК 10^{-3}—10^{-6} торр 2. Охлаждение элементов СКС в пределах 7—20 К 3. Обеспечение модуля формирования криоядра газообразными изотопами водорода H_2 и D_2 4. Обеспечение МИС, МДМ и УПКМ жидкими хладагентами (азот, гелий) 5. Электроснабжение: трёхфазная сеть 380 В, 50 Гц

Другой особенностью СКС является возможность работать в частотном режиме с частотой не менее одна мишень в час. Чтобы обеспечить этот режим, все операции в системе производятся только с мишенями, свободными от какого-либо подвеса (так называемый бесподвесный подход).

Далее представлены два варианта конструкции СКС, предназначенные для случаев расположения МИС наверху камеры и на её горизонтальной оси. Для определённости полагается, что способ формирования криогенного ядра — экструзия. Однако узел формирования может работать и на основе метода in-situ, что принципиально не влияет на общую компоновку системы.

Конструкторское решение № 1. Отличительные особенности конструкторского решения следующие (рис. 35):

- гравитационная доставка мишени в центр камеры;
- на всех производственных этапах мишень находится в защитном кожухе (трубка из нержавеющей стали либо покрытие из тефлона или из ВТСП, см. рис. 16).

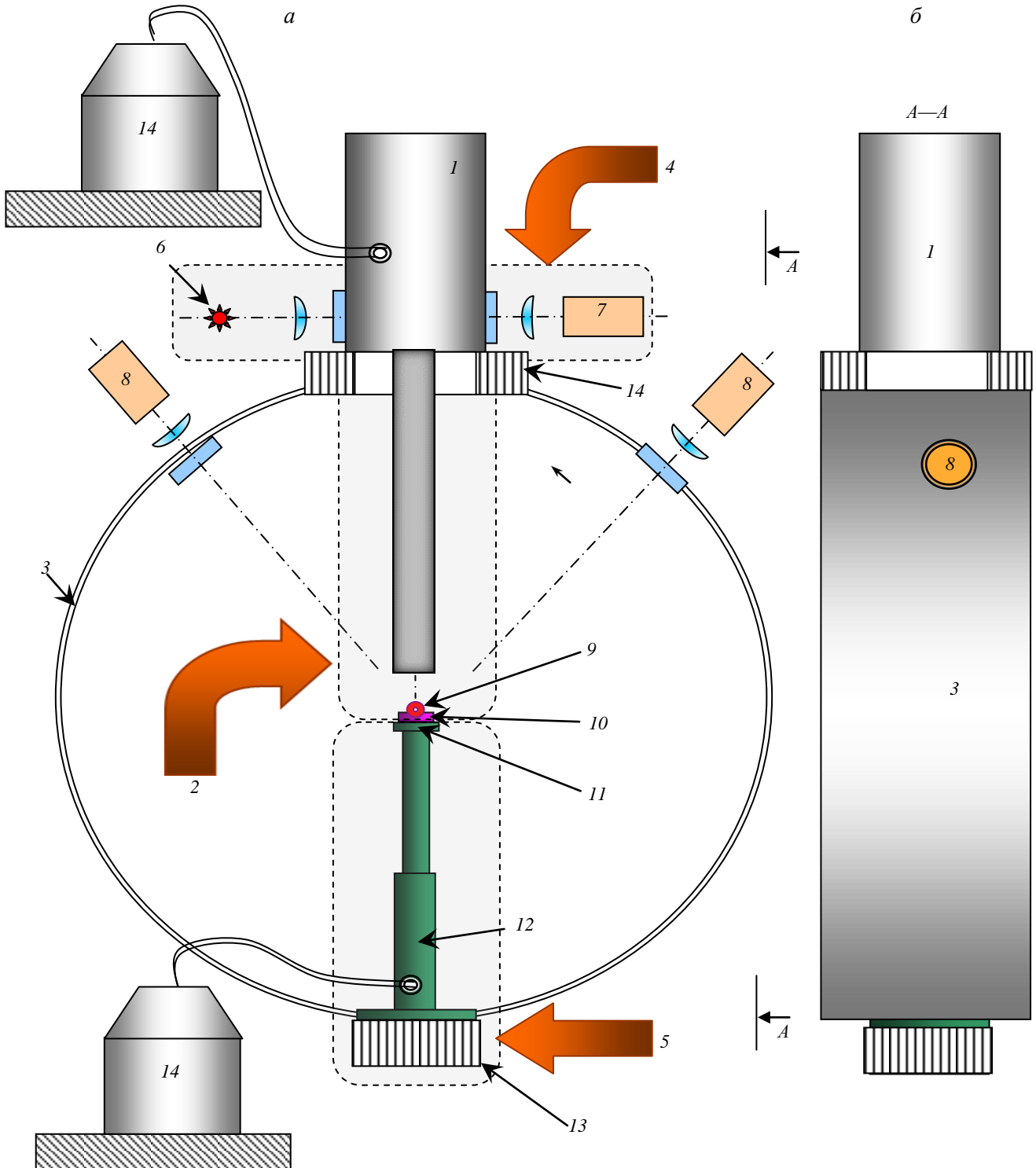


Рис. 35. Конструкторское решение № 1 сечения СКС, перпендикулярного оси симметрии ВТК (а), и вид сбоку (б): 1 — модуль для изготовления и сборки (МИС) криогенного ядра с внешней свинцовой оболочкой; 2 — модуль доставки и размещения (МДР) готовой криогенной мишени в центре вакуумной тестовой камеры; 3 — экспериментальная вакуумная камера; 4 — система контроля качества криогенной мишени (СКМ); 5 — устройство позиционирования криогенной мишени (УПКМ) в центре камеры; 6 — источник света; 7 — ПЗС-камера системы контроля; 8 — ПЗС-камера системы юстировки; 9 — цилиндрическая криогенная мишень; 10 — держатель криогенной мишени; 11 — пятка криохолодильника; 12 — криохолодильник; 13 — узел юстировки; 14 — система криостатирования

Сначала осуществляется сборка всех элементов СКС в единое устройство на базе ВТК (в реальных экспериментах LAPLAS элементы монтируются на экспериментальной вакуумной камере установки; именно эта камера показана на рис. 35). Серия цилиндрических свинцовых оболочек (семь штук) загружается в МИС (поз. 1 на рис. 3), после чего осуществляются вакуумирование внутренних объёмов СКС и их охлаждение до рабочей температуры. После изготовления и сборки криогенной мишени в МИС осуществляется предварительный контроль её качества (поз. 5 на рис. 3). Необходимые оптические элементы (объективы, конденсоры и пр.), источник света (поз. 6 на рис. 35) (обычная или лазерная подсветка) и ПЗС-камера (поз. 7 на рис. 35) образуют систему контроля качества (поз. 4 на рис. 35).

Если тест успешно пройден, мишень направляется в модуль доставки МДМ (поз. 2 на рис. 35). На рисунке этот модуль не детализирован, выделена только область, где данная система располагается. Возможные варианты технического решения системы гравитационной доставки рассматривались ранее (см. рис. 25 и 26).

С помощью модуля доставки мишень (поз. 9 на рис. 35) попадает на криогенный держатель (поз. 10), закреплённый на пятке криохолодильника (поз. 11), температура которой не превышает 10—11 К. Держатель ориентирует ось мишени в заданном направлении (параллельно оси пучка). Температура мишени поддерживается на уровне не выше 10—11 К с помощью криохолодильника (поз. 12) и охлаждаемых радиационных экранов (на рис. 35 не показаны).

Предварительная юстировка МДМ и УПКМ, а также регулировка линейного положения мишени по осям XYZ и её окончательная юстировка осуществляются с помощью подсистемы позиционирования, которая располагается вне вакуумной камеры. В неё входят узел перемещения (поз. 13) и две ПЗС-камеры (поз. 8), оснащённые необходимой оптикой и также расположенные вне вакуумной камеры под углом $\sim 90^\circ$ в плоскости, нормальной к пучку. ПЗС-камеры предназначены для контроля положения мишени, а также для осуществления её финальной характеристики.

Конструкторское решение № 2. Общая компоновка СКС в конструкторском решении № 2 показана на рис. 36. Отличительные особенности этого решения следующие:

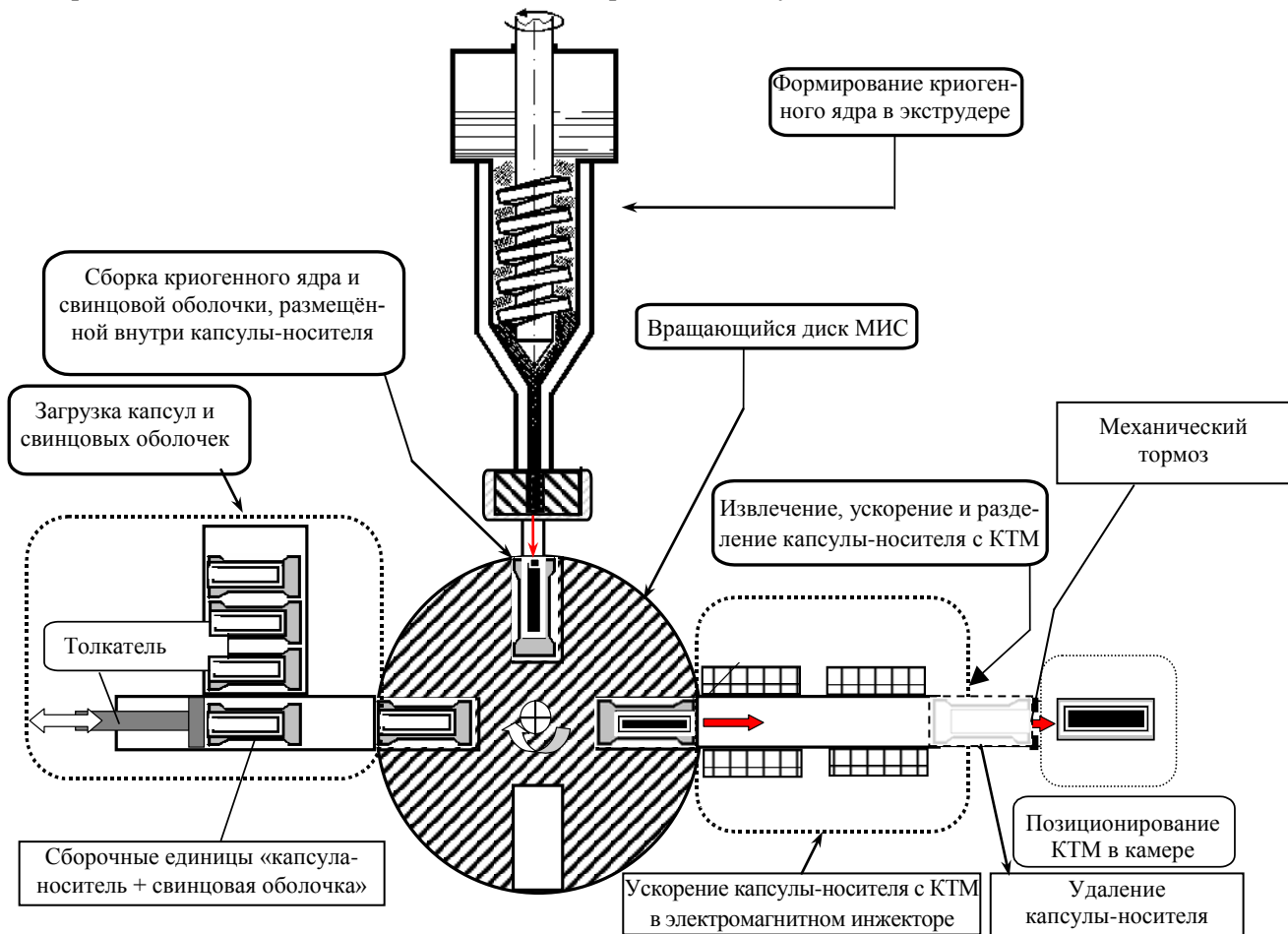


Рис. 36. СКС. Конструкторское решение № 2

- электромагнитная доставка мишени в центр камеры;
- на этапах формирования, сборки и доставки мишень находится внутри капсулы-носителя из магнитоактивного вещества.

В рамках выбранного подхода выполняется следующая последовательность операций:

- сборка массива капсул-носителей с цилиндрическими оболочками из свинца (осуществляется вручную заранее) и их загрузка во вращающийся диск МИС;
- транспорт (вращением ротационного диска) одной капсулы с оболочкой к месту сборки оболочки с криогенным ядром;
- формирование криогенного ядра, контроль его качества и гравитационная загрузка криогенного ядра в оболочку;
- транспорт (вращением ротационного диска) капсулы с КТМ ко входу в систему доставки;
- электромагнитная доставка капсулы с КТМ в центр ВТК;
- торможение капсулы на выходе из системы доставки и инерционная подача КТМ на криогенный держатель УПКМ. Удаление капсулы-носителя;
- позиционирование и финальная характеристика КТМ.

Направление дальнейших исследований. Проведённые исследования показали, что существует ряд открытых вопросов, ответы на которые определяют окончательный выбор конструкции СКС. Перечислим эти вопросы.

Один из ключевых вопросов касается защиты боковой поверхности КТМ и её торцов от механического повреждения в процессе доставки и позиционирования.

Допустимо ли внести в конструкцию КТМ защитный элемент в виде тонкостенной трубки из нержавеющей стали, либо покрытия из тефлона или ВТСП? В случае положительного ответа на этот вопрос конструкция СКС существенно упрощается, надёжность работы системы возрастает, а её стоимость снижается. При этом риск нарушения качества КТМ в процессе доставки и позиционирования существенно уменьшается. Решение вопроса о возможном применении защитного элемента необходимо, так как в исходном дизайне мишени этот элемент отсутствует [8].

Существует блок вопросов, касающихся требований к точности изготовления свинцовой оболочки (линейные допуски, несоосность, допустимая шероховатость поверхностей и др.). Окончательный выбор способа изготовления свинцовой оболочки мишени и оценка стоимости изготовления серии оболочек могут быть сделаны только после того, как будут теоретически определены перечисленные требования.

Следующий блок вопросов касается уточнения требований к качеству криогенного ядра, в том числе: каков допустимый размер неоднородности в объёме криогенного ядра КТМ (структурная неоднородность, посторонние включения, пустоты, другие дефекты структуры), какова допустимая шероховатость торцов?

Поскольку от требований к качеству существенно зависят выбор метода формирования и время приготовления ядра, а также стоимость и режим работы СКС (в том числе допустимая частота подачи КТМ в центр камеры), то требования к качеству криогенного ядра должны быть сформулированы более чётко.

Следующий вопрос связан с сохранением качества криогенного ядра в процессе доставки и позиционирования КТМ, в частности, с сохранением формы торцов.

Здесь необходимо точно определить как требуемую форму торцов криогенного ядра, так и допустимые от неё отклонения. При этом надо понимать, что в процессе позиционирования испарение вещества с торцов может происходить неоднородно, так что их форма будет искажаться. Может оказаться, что деградация торцов криогенного ядра происходит быстрее, чем завершается процесс позиционирования. В этом случае на этапе формирования криогенного ядра потребуется выполнить специальное профилирование торцевой поверхности. Отметим, что для этого потребуется как разработка специальной технологии профилирования торцов, так и создание соответствующего узла в модуле изготовления и сборки мишеней. Это приведёт к общему удорожанию СКС и снизит надёжность её работы.

В связи с этим проблема теплового разрушения торцов криогенного ядра требует тщательного теоретического анализа, проведение которого есть одна из первоочередных задач следующего этапа исследований.

Следует подчеркнуть, что решение проблемы сохранения криогенного ядра в экспериментальной камере является ключевым моментом при оптимизации дизайна СКС ещё и по следующим причинам:

— время жизни криогенного ядра в камере определяет технические требования к держателю КТМ (форма, температура);

— скорость испарения торцов определяет технические требования к системе вакуумирования камеры;

— перечисленные параметры (время жизни и скорость испарения) определяют требования к средствам защиты КТМ и, возможно, к дизайну самой мишени. Например, в случае слишком интенсивного процесса испарения может потребоваться переход на мишень с закрытыми торцами.

Следующий вопрос касается способа доставки КТМ в зону облучения экспериментальной установки.

В данной работе нами рассмотрены два способа доставки — гравитационный и электромагнитный. Первый способ является наиболее экономичным средством доставки, однако он требует размещения МИС в верхней части камеры. Второй способ применим при любом расположении МИС относительно горизонтальной оси камеры. Однако электромагнитный способ менее экономичен, чем гравитационный, поскольку требует создания линейного электромагнитного двигателя, а также создания набора специальных капсул-носителей КТМ. Применение электромагнитного способа даёт возможность тонкой регулировки скорости доставки с целью минимизации механических нагрузок на КТМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа завершает цикл работ [1—5], посвящённых созданию эффективных технологий по производству КТМ для целей ИТС на основе метода FST, предложенного и разработанного в ФИАН. Фундаментальное отличие метода FST от традиционного подхода — это положенный в его основу принцип работы с движущимися бесподвесными мишенями, что позволяет осуществлять формирование и инжекцию в лазерный фокус дешёвых КТМ в непрерывном режиме или с необходимой частотой. Метод FST является уникальным и не имеет аналогов в мире. В настоящее время в ФИАН создано лабораторное оборудование [1—5], которое моделирует весь процесс приготовления незакреплённой КТМ — от её заполнения топливом до осуществления доставки или, другими словами, инжекции КТМ в камеру взаимодействия с лазерным излучением. Дальнейшее развитие FST-подхода осуществляется в рамках программы по созданию модульного варианта фабрики сферических КТМ реакторного класса и коммерциализации полученных результатов.

Цикл исследований, представленных в данной работе, продемонстрировал, что FST-подход применим не только для сферических криогенных мишеней, но также и цилиндрических КТМ, необходимых для проведения экспериментов LAPLAS на установке FAIR с тяжёлоионным драйвером.

Финансовая поддержка данной работы осуществлялась в рамках контракта РФФИ № 15-02-02947, контракта ФИАН—коллаборация HEDgeNOB (Германия), а также в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 30. Авторы благодарны всем участникам перечисленных контрактов и программы Президиума РАН.

REFERENCES

1. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (review of world results). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 1, p. 57 (in Russian).
2. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial fusion energy (manufacture of stable superdispersed layer of solid hydrogen isotopes. — In the same place, issue 2, p. 75 (in Russian).
3. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (FST formation of cryogenic fuel layer in moving free-standing shells: theory and experiment). — In the same place, issue 3, p. 59 (in Russian).
4. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (formation of reactor-scaled cryogenic targets). — In the same place, issue 4, p. 51 (in Russian).

5. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (concept of cryogenic target factory based on FST-layering method). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 1, p. 29 (in Russian).
6. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Blazevic A. et al.** Cryogenic targets for the LAPLAS experiments: fabrication, manipulation and survival study. Report P034. — In: 30th European Conf. on Laser Interaction with Matter. Darmstadt, Germany, 31 Aug. — 5 Sept., 2008.
7. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Koshelev E.L. et al.** A Study on fabrication, manipulation and survival of cryogenic targets required for the experiments at the facility for antiproton and ion research: FAIR. — Laser and Particle Beams, 2009, vol. 27, p. 255.
8. **Piriz A.R., Tahir N.A., Cela J.J.L. et al.** Analytical models for the design of the LAPLAS experiment. — Contributions to Plasma Physics, 2007, vol. 47, № 4—5, p. 213
9. **Sakamoto S., Yamada H., Takeiri Y. et al.** Repetitive pellet fuelling for high-density/steady-state operation on LHD. — Nuclear Fusion, 2006, vol. 46, p. 884
10. **Viniar I., Geraud A., Yamada H. et al.** Pellet injectors developed at the Pelin laboratory for steady-state plasma fuelling. — Plasma Sci. Technol., 2006, vol. 6, № 3, p. 2286.
11. **Combs S.K., Baylor L.R., Caughman J.B.O. et al.** Pellet Delivery and Survivability Through Curved Guide Tubes for Fusion Fueling and its Implications for ITER. Report, Contract DE-AC05-00OR22725, 2004.
12. **Combs S.K.** ORNL mock-up tests of inside launch pellet injection on JET and LHD. — Fusion Eng. Design, 2001, vol. 58—59, p. 343.
13. **Kutee B.V.** Technology for fusion reactors, based on the macroparticles injection. — Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of technical physics), 1999, vol. 69, issue 9, p. 63 (in Russian).
14. **Vinyar I.V.** Periodic injector with a porous macroparticles former for fuel input into plasma. — Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of technical physics), 1999, vol. 69, issue 5, p. 35 (in Russian).
15. **Vinyar I.V., Skoblikov S.V., Koblents P.Yu.** Injector of hydrogen macroparticles with a screw extruder. — Pis'ma v ZhTF (Letters to JTPH), 1997, issue 23, № 20, p. 43 (in Russian).
16. **Kuteev B.V., Viniar I.V., Sergeev V.Yu. et al.** Development of an ITER pellet fueling system in Russia. — Fusion Technology, 1994, vol. 26, p. 642,
17. **Combs S.K., Foust C.R.** New extruder-based deuterium feed system for centrifuge pellet injection. — Rev. Sci. Instrum., 1997, vol. 68, p. 4448.
18. **Combs S.K.** Pellet injection technology. — Rev. Sci. Instrum., 1993, vol. 67, p. 1679.
19. **Sethian J.D., Gerber K.A., Say M.O.** Solid deuterium fiber extruder. — Rev. Sci. Instrum., 1987, vol. 58, № 4, p. 536.
20. **Grilly E.R., Hammel J.E., Rodrigues D.J. et al.** Production of solid D2 threads for dense Z-pinch plasmas. — Rev. Sci. Instrum., 1985, vol. 56, № 10, p. 1885.
21. **Krause H.** Apparatus for producing sticks of solid deuterium. — J. Physics E: Sci. Instrum., 1973, vol. 6, p. 1132.
22. **Pechacek R.E., Greig J.R., Raleigh M. et al.** Plasma production by staged laser irradiation of mm-size deuterium pellets. — Rev. Sci. Instrum., 1981, vol. 52, № 3, p. 371.
23. **Friedman W.D., Halpern G.M., Brinker B.A.** Target fabrication and positioning techniques for laser fusion experiments. — Rev. Sci. Instrum., 1974, vol. 45, № 10, p. 1245.
24. **Prut V.V., Shibaev S.A.** A hydrogen pellet injector.: Preprint IAE 5258/7. Moscow, 1990 (in Russian).
25. **Combs S.K., Milora S.L., Foust C.R. et al.** Repeating pneumatic hydrogen pellet injector for plasma fueling. — Rev. Sci. Instrum., 1985, vol. 56, p. 1173.
26. **Milora S.L.** Design of a tritium pellet injector for TFTR. — Fusion Engineering, 1991, vol. 2, p. 716.
27. **Hiratsuka H., Kawasaki K., Miyo Y. et al.** A four-pellet pneumatic injection system in the JT-60. — Fusion Eng. Design, 1991, vol. 13 (4), p. 417.
28. **Gouge M.J.** Tritium pellet injector for TFTR. — Fusion Technol., 1992, vol. 21, p. 1665.
29. **Fisher P., Gauge M.** Extrusion of tritium D—T pellets for ITER fueling. — Fusion Technol., 1996, vol. 30, p. 845.
30. **Combs S.K., Foust C.R., Qualls A.L.** Extruder system for high-throughput/steady-state hydrogen ice supply and application for pellet fueling of reactor-scale fusion experiments. — Rev. Sci. Instrum., 1998, vol. 69, p. 4012.
31. **Combs S.K., Baylor L.R., Caughman J.B.O. et al.** Pellet delivery and survivability through curved tubes for fusion fueling and its implications for ITER. — Fusion Technol., 1996, vol. 2, p.1236.
32. **Lang P.T.** A system for cryogenic hydrogen pellet high speed inboard launch into a fusion device via guiding tube transfer. — Rev. Sci. Instrum., 2003, vol. 74, p. 3974.
33. **Alekseeva L.A., Strzhemechnyi M.A., Butenko Yu.V.** Low-temperature plasticity of dilute solid solutions of Ne in $n\text{-H}_2$. — Fizika nizkikh temperatur (Physics of low temperatures), 1997, issue 23, p. 448 (in Russian).

34. **Alekseeva L.A., Strzhemechnyi M.A., Shcherbakov G.N.** The effect of neon admixture on n -H₂ low temperature plasticity. — In the same place, 1995, issue 21, p. 983 (in Russian).
35. **Alekseeva L.A., Syrkin E.S., Vashchenko L.A.** Low-temperature plasticity and lattice dynamics of solid steam hydrogen with isotopic impurity. — *Fizika tverdogo tela (Physics of the solid state)*, 2003, issue 45, p. 1024 (in Russian).
36. **Krupskiy I.N., Leont'eva A.V., Indan L.A., Evdokimov O.V.** Features of solid hydrogen low-temperature plasticity. — *Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh)*, 1976, issue 24, p. 297 (in Russian).
37. **Born M., Vol'f E.** Optics fundamentals. — M.: Mir (World), 1970 (in Russian).
38. **Zigel' R., Khaull Dzh.** The heat exchange by radiation. — In the same place, 1975 (in Russian).
39. **Belyaev N.M., Ryadno A.A.** Mathematical methods of thermal conductivity. — Kiev: Vysshaya shkola (Higher school), 1993 (in Ukrainian).
40. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Koshelev E.L. et al.** Cryogenic targets for the LAPLAS experiments at FAIR. Report. — In: 7th Intern. EMMI Workshop on Plasma Physics with Intense Heavy Ion and Laser Beams at FAIR. Moscow, Russia, Dec. 9—10, 2014.
41. **Aleksandrova I.V., Ivanenko O.M., Kalabukhov V.A. et al.** HTSC maglev systems for IFE target transport applications. — *J. Russian Laser Research*, 2014, vol. 35 (2), p. 151.
42. **Aleksandrova I.V., Akunets A.A., Bezotosnyi P.I. et al.** On the application of high-temperature superconducting tapes of second generation in systems of targets cryogenic transport for ICF. — *Kratkie soobshcheniya po fizike (Short messages on physics)*, 2015, № 11, p. 3 (in Russian).
43. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Tolokonnikov S.M. et al.** Protective sabot for cryogenic target delivery to the laser focus. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2004, issue 2, p. 11 (in Russian).
44. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Osipov I.E. et al.** Progress in the extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — *Fusion Sci. Technol.*, 2003, vol. 35, № 3, p. 290.
45. **Ferrites and magnetodielectrics.** Reference book. Edited by N.D. Gorbunov and G.A. Matveev. — M.: Sovetskoe radio (Soviet radio), 1968, p. 175 (in Russian).
46. **Lichtenecker K.** Mischkorpertheori als Wahrscheinlichkeitsproblem.— *Physikalische Zeitschrift*, 1924, vol. 25, № 8, p. 169.
47. **Koresheva E.R., Merkul'ev Yu.A., Nikitenko A.I. et al.** Destruction features of cryogenic targets and their input into the focus of a powerful laser. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 1988, issue 1, p. 57 (in Russian).
48. **Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. et al.** A device for cryotarget rep-rate delivery in IFE target chamber. — In: *Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001 (ELSEVIER)*, 2002, p. 810.
49. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V.** ICF cryotarget: delivery. — *J. Moscow Physics Soc.*, 1994, vol. 4, № 3, p. 183.
50. **Chatain D., Périn J.P., Bonnay P. et al.** Cryogenic systems for inertial fusion energy. Report. — In: 3rd Moscow Workshop on Targets and Applications. Moscow, Russia, Oct. 15—19, 2007.

AUTHORS

Aleksandrova I.V. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia;

Koresheva E.R. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; elena.koresheva@gmail.com

Koshelev E.L. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

Krokhin O.N. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Nikitenko A.I. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

Osipov I.E. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; Co Ltd «Inter RAO UES Power Efficiency Centre», Bol'shaya Pirogovskaya ul. 27-2, Moscow, Russia

Timasheva T.P. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

Received 5 April 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 34—65.